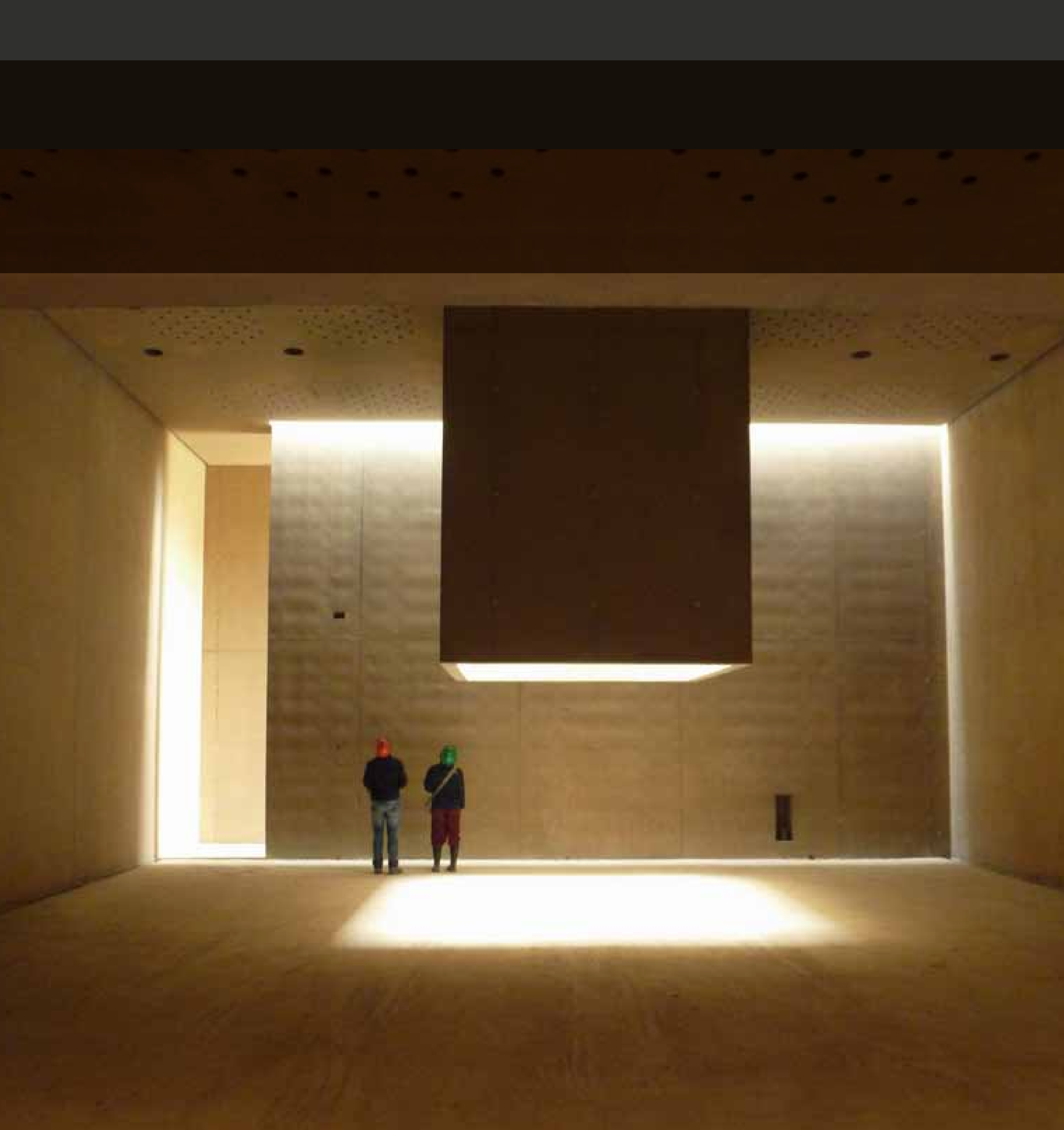
# HISTOIRES DE BÉTON ARMÉ

## PATRIMOINE, DURABILITÉ ET INNOVATIONS





**Banque Bruxelles Lambert (actuellement ING)** © DECOMO
1964/1993
Architectes 1964 : Skidmore, Owings & Merill (Gordon Bunshaft)
Architectes 1993 : Skidmore, Owings & Merill - Philippe Samyn and Partners architects & engineers

**Crématorium *Hofheide* à Holsbeek (Aarschot)** © Coussée & Goris
2013
Architectes : RCR Aranda Pigem Vilalta Arquitectes & Coussée & Goris architecten
Ingénieurs : Studieburo Mouton

**Auvent de l'Institut de Sociologie de l'ULB à Bruxelles** © Michel Provost
1966
Architectes : Robert Puttemans et Pierre Guilissen
Ingénieurs : Bureau d'études Setesco (André Paduart)

# HISTOIRES DE BÉTON ARMÉ

## PATRIMOINE, DURABILITÉ ET INNOVATIONS

**Comité de rédaction : Jean-François Denoël, Bernard Espion, Armande Hellebois, Michel Provost**

# SOMMAIRE



# AVANT-PROPOS

« Histoires de béton armé » : histoire du béton !

Employé dès la haute antiquité, le béton romain était fabriqué avec une sorte de ciment et a laissé quelques édifices exemplaires toujours visibles aujourd'hui comme le Panthéon de Rome, édifice bâti au début du deuxième siècle de notre ère, qui supporte la plus grande coupole de toute l'Antiquité (43,3 m de diamètre à l'intérieur) et qui reste la plus grande du monde en béton non armé, le pont du Gard… Tombé dans l'oubli ensuite, c'est en 1817 que le ciment moderne est inventé par Louis Vicat qui découvre le procédé et la composition du ciment Portland en cherchant à améliorer la résistance et une certaine durabilité des mortiers. Très vite, le béton devient le matériau révolutionnaire de la construction au vingtième siècle.

François Coignet, François Hennebique, puis Auguste Perret et ses frères entrepreneurs sont les inventeurs du béton armé. Celui-ci compte parmi les piliers fondateurs dans cette voie révolutionnaire de l'art de construire et occupe une place incontournable dans l'histoire de l'architecture contemporaine.

Comme l'acier a remplacé les constructions en bois du dix-neuvième siècle, le béton s'est substitué à la pierre dès le début du siècle dernier pour la construction d'ouvrages importants : ponts, halls industriels, bâtiments publics, immeubles d'habitations…

Considéré par de nombreux architectes, dont les plus prestigieux de notre époque, comme un moyen d'expression plastique, le béton étant coulé, il permet d'imaginer des formes en toute liberté et de réaliser les constructions les plus audacieuses.

Rappelons que la population mondiale, qui était de l'ordre de 250 000 individus au début de notre ère, a atteint un milliard de personnes en 1800 et depuis est passée en deux siècles à sept milliards. Le béton a largement contribué à la construction des infrastructures nécessaires pour faire face à cette explosion démographique en permettant la réalisation de nombreux ouvrages d'art, ouvrages hydrauliques et bien sûr de logements. Il offre les solutions aux défis de notre temps et répond parfaitement aux trois piliers de la construction durable, ou plutôt du « développement soutenable ». En effet :

- il est produit localement à partir de matériaux naturels disponibles en abondance sur la planète. Son énergie « grise » est quasiment la plus faible de tous les matériaux de construction. Associé à une grande longévité et 100 % recyclable en fin de vie, il répond vraiment aux enjeux des émissions de gaz à effet de serre, de gaz acidifiants et aux impacts environnementaux ;

- c'est un matériau sain, inerte, imputrescible, incombustible, résistant au feu, excellent isolant acoustique conçu par l'homme et pour l'homme et à ce titre, il satisfait aux impératifs du pilier social. Il permet de loger des populations importantes dans d'excellentes conditions d'hygiène, de sécurité et de confort. Grâce à sa grande capacité et inertie thermique, équivalente à celle de la pierre naturelle d'antan, à son étanchéité à l'air, il révolutionne le logement « passif » ou à faible consommation d'énergie ;

- enfin, il est économique. Et, tout en étant, par ses concepts constructifs simples, le garant d'une architecture peu onéreuse et très durable dans le sens le plus noble du terme, il constitue une composante essentielle du langage architectural de notre temps.

Grâce au concours de nombreux auteurs et à la passion qu'éprouvent des historiens, des ingénieurs et des architectes pour ce matériau, il nous a paru important de publier le présent recueil d'histoires de béton armé. Cet ouvrage, qui ne se veut pas exhaustif, retrace les recherches qui ont présidé à la mise au point de ce matériau et à toutes ses prouesses, en s'appuyant sur de multiples exemples belges et parfois étrangers.

La durabilité n'est pas un vain mot et pour réaliser des constructions de qualité, il faudra encore répéter souvent que la qualité est l'affaire de tous : concepteurs, architectes, ingénieurs, producteurs, entrepreneurs, contrôleurs… Les bétons d'aujourd'hui ne sont plus ceux d'il y a cinquante ans et leur technicité s'est largement développée au cours de ces dernières années. Bien réalisés, les ouvrages en béton sont appelés à défier le temps. Soyons donc vigilants et exigeants.

Qu'il me soit permis de remercier vivement le Comité Patrimoine et Histoire de la FABI qui sous la houlette de son Président, Michel Provost, a mené à bien ce travail d'un grand intérêt pour toute la communauté des historiens, des ingénieurs et des architectes de ce pays. Merci aussi au Comité de rédaction qui a œuvré sans relâche à la finalisation de ce livre. Ces « histoires de béton armé » sont le reflet du foisonnement d'idées, de génie et d'exploits qui ont donné leurs lettres de noblesse à ce matériau extraordinaire qu'est le béton.

**André Jasienski**
**Directeur de FEBELCEM**

# INTRODUCTION

Le présent ouvrage est issu de quatre demi-journées d'étude consacrées à l'histoire du béton armé. Ces demi-journées organisées d'octobre 2010 à avril 2013 par le Comité Patrimoine et Histoire de la FABI avaient pour titre « Connaissez-vous les bétons armés et précontraints ? ».

**La FABI** (Fédération Royale d'Associations Belges d'Ingénieurs Civils, d'Ingénieurs Agronomes et de Bioingénieurs) rassemble les associations d'écoles d'ingénieurs de la Communauté française et l'aile francophone de l'Association Royale des Ingénieurs Civils issus de la Faculté Polytechnique de l'École Royale Militaire. Elle représente quelques 7 000 ingénieurs et assure la promotion des études et du métier de l'ingénieur.

**Le comité Patrimoine et Histoire de la FABI** a pour objectif de contribuer à la mise en valeur et à la protection du patrimoine d'ingénierie de la construction au travers notamment de l'organisation de conférences, de visites, de journées d'études… comme celles qui sont à la base de la présente publication. Ce comité est composé d'ingénieurs mais aussi d'architectes, d'historiens, d'historiens de l'art, d'archéologues, acteurs du patrimoine en Région Wallonne et Région de Bruxelles-Capitale.

Les contributions des intervenants à ces demi-journées d'étude ont ici été regroupées par thèmes pour former les sept chapitres de cette publication. Ces thèmes sont soit chronologiques (les origines, avant ou après la Seconde Guerre mondiale), soit technologiques (le béton armé, le béton précontraint, l'industrialisation), soit encore liés au type d'ouvrages (bâtiments, voiles minces ou ponts).

Le béton armé qui apparaît dans le dernier quart du 19ème siècle s'est rapidement révélé comme le matériau incontournable de la construction. D'abord utilisé pour sa résistance au feu, ses caractéristiques techniques et son faible coût, il a progressivement été investi par les architectes qui l'on fait passer de matériau de construction à matériau d'architecture. Il a permis la couverture de grands espaces, d'abord par des arcs puis par des voiles minces. Il est omniprésent dans le domaine des ponts principalement à partir du milieu du 20ème siècle grâce au béton précontraint. Il se prête à la préfabrication d'abord de manière technologique puis architecturale au travers des façades en béton architectonique. Critiqué quand il a été associé à des constructions architecturalement et/ou techniquement médiocres, il a acquis définitivement ses lettres de noblesse depuis la fin du 20ème siècle.

En un peu plus d'un siècle, le béton armé a permis la réalisation d'ouvrages exceptionnels qui font aujourd'hui partie de notre **patrimoine** culturel immobilier.

Un ouvrage en béton bien conçu et bien réalisé résiste particulièrement bien à l'épreuve du temps. Le béton est un matériau **durable.**

Arrivé à maturité depuis le dernier quart du 20ème siècle, le béton n'en reste pas moins un matériau en pleine évolution. Sa technologie est aujourd'hui plus qu'hier une zone d'**innovations**. Sa composition évolue, sa résistance et son aptitude à la mise en œuvre augmentent, permettant la réalisation d'ouvrages plus importants, plus complexes.

Afin de situer dans le temps les différentes techniques et réalisations dont il est question dans cet ouvrage, nous donnons ci-après une liste chronologique de « points forts » de l'histoire du béton armé et précontraint. Pour ne pas noyer le lecteur, nous en avons limité le nombre, et donc avons dû faire des choix qui sont bien entendu en partie subjectifs.

Le domaine du béton armé n'est pas uniquement celui des ingénieurs et des architectes, il fait partie de notre patrimoine collectif. Pour faciliter l'accès au lecteur non spécialiste, nous avons ajouté en fin d'ouvrage un glossaire qui définit les termes techniques essentiels.

La présente publication, grâce aux contributions d'ingénieurs, d'architectes, d'historiens, de professeurs, de praticiens, parcourt plus d'un siècle d'histoire du béton armé. Qu'ils soient tous remerciés ici pour le travail accompli. Mais le travail et la bonne volonté ne suffisent pas. Merci également à l'Institut du Patrimoine wallon pour sa participation financière et à FEBELCEM pour son soutien actif à la réalisation de cet ouvrage.

Nous espérons que cette publication contribuera à diffuser la connaissance dans le domaine du béton armé et aidera ainsi à la conservation de notre patrimoine culturel immobilier et à son développement par la construction d'ouvrages de qualité en béton armé.

**Michel Provost**
**Président du Comité FABI Patrimoine et Histoire**
**Professeur à l'Université Libre de Bruxelles**

# REPÈRES HISTORIQUES

Nous avons différencié

- les événements déterminants non directement liés à des constructions
- les bâtiments
- les couvertures d'espaces en voiles minces
- les ponts
- les travaux d'infrastructures : routes et barrages.

Pour les constructions, les dates indiquées sont celles de la mise en service ou de l'inauguration.

**1855 Barque de J.L. Lambot constituée d'un treillis métallique enduit de mortier** présentée à l'Exposition universelle de Paris. C'est une des premières applications de l'association fer-béton. *(voir pp. 17, 83)*

**1867 Brevet de J. Monier pour la construction de bacs à fleurs et de caisses en ciment armé**, ce système sera utilisé et surtout amélioré par l'entreprise allemande Wayss & Freytag dès 1885. *(voir pp. 18, 83)*

**1886** Une des premières utilisations du béton armé : la construction des **planchers du Reichstag** à Berlin par G. Wayss et M. Koenen. Elle lance l'application du béton armé en Allemagne.

**1892 Premier brevet significatif dans le domaine du béton armé** déposé en France et en Belgique par F. Hennebique. Il constitue un tournant dans l'utilisation et la diffusion du béton armé en Europe. *(voir pp. 18, 23, 25, 27, 29, 35, 38, 48, 79)*

**1894 Les Moulins de Nantes** - France. Réalisés par l'entreprise Hennebique. Une des premières constructions en béton armé importante par la taille et par l'utilisation de larges porte-à-faux.

**1899 Pont Camille de Hogues** - Châtellerault - France. Pont à 3 travées supportées par des arcs en béton armé. C'est un des premiers ponts en arc en béton armé. Ingénieur : F. Hennebique

**1901 Pont de Zuoz** - Engadine - Suisse. Pont en arc à trois articulations à caisson de 38 m de portée. C'est le premier pont de ce type construit en béton armé. Ingénieur : R. Maillart *(voir p. 84)*



Pont de Zuoz[1]

**1903 Immeuble rue Franklin, 23** - Paris - France. Construit par les frères A. et G. Perret avec la collaboration de F. Hennebique. Le béton armé, ici non apparent, permet de rationnaliser l'espace.




Immeuble rue Franklin[2]

**1903 Ingalls Building** - Cincinnati - USA. Premier immeuble de grande hauteur en béton armé. En façade, le béton est recouvert de marbre et de briques. Architectes : Elzner & Anderson

**1904 Église Saint-Jean-de-Montmartre** - Paris - France. Construite à partir de 1894 selon le système de briques armées de l'ingénieur P. Cottancin. Architecte : A. de Baudot *(voir p. 48)*

**1905 Héliopolis** - Le Caire - Égypte. Ville nouvelle fondée par le Belge Edouard Empain et dont la totalité des constructions est en béton armé système Hennebique. *(voir p. 35)*

**1905 Passerelle Mativa** - Liège - Belgique. Passerelle en béton armé système Hennebique de 55 m de portée et de 35 cm d'épaisseur à la clé. Ingénieur : F. Hennebique *(voir pp. 29, 40, 79, 131)*

**1906 - 1908 Mise en œuvre de « dalles-champignons »** par Turner aux USA (Minnéapolis) et par R. Maillart en Suisse. *(voir pp. 82, 87, 153)*

**1906 Publication des Instructions françaises relatives à l'utilisation du béton armé**. Cette règlementation servira de document de référence en Belgique jusque dans les années 1920.

**1910 Pont du Veurdre** - France. Pont à 3 travées supportées par des arcs à 3 articulations en béton armé. Relèvement des arcs après fluage par utilisation de vérins à la clé. Ingénieur : E. Freyssinet *(voir p. 58)*

**1910 « Grand Trunk Pacific elevator »** - Fort William - Ontario - Canada. Une des gigantesques batteries de silos à grain qui ont fasciné et influencé les architectes W. Gropius et Le Corbusier. *(voir p. 128)*

**1911 Pont du Risorgimento** - Rome - Italie. Pont en arc en caisson en béton armé de 100 m d'ouverture. Record mondial au moment de sa construction. Ingénieur : F. Hennebique *(voir pp. 25, 80)*



Pont du Risorgimento[3]

**1913 Théâtre des Champs Élysées** - Paris - France. Bâtiment à ossature en béton. En façade le béton est recouvert de marbre. Architectes : H. van de Velde puis A. Perret *(voir pp. 127, 128)*

**1913 Halle du Centenaire** - Wroclaw - Pologne. Structure de la couverture composée d'arcs en béton armé rayonnant de 67 m de portée. Architecte : M. Berg - Ingénieur : W. Gehler *(voir pp. 15, 119)*

**1914 Schéma Dom-Ino** imaginé par Charles Edouard Jeanneret (pas encore Le Corbusier). Le béton armé permet de dissocier la structure et la définition des espaces. *(voir pp. 127, 128)*

**1918 Premier réfrigérant atmosphérique en voile mince de béton en forme d'hyperboloïde de révolution** - Heerlen - Pays-Bas. Hauteur 35 m. Ingénieurs : F. K. T. van Iterson et G. Kuypers *(voir p. 123)*

**1920 Ateliers de confection Esders** - Paris - France. Immeuble industriel en béton armé. La toiture est supportée par de grands arcs en béton armé. Architectes : A. et G. Perret



Ateliers Esders[4]

**1921 Columbia Pike** - Virginie - USA. Premiers tronçons (expérimentaux) d'une route en béton armé continu.

**1923 Notre-Dame du Raincy** - France. Première église de France en béton armé brut. Toiture composée de berceaux surbaissés en voiles minces. Architectes : A. et G. Perret

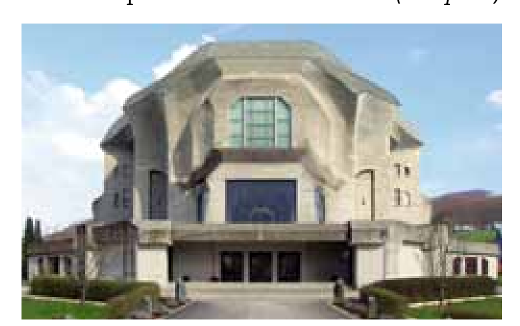
**1923 Hangars d'Orly** - Paris - France. Couverture parabolique de 86 m de portée en voiles plissés en béton armé. Ingénieur : E. Freyssinet - Introduction de la vibration mécanique du béton.

■ **1925 Planétarium d'Iéna** - Allemagne. Coupole en béton de 6 cm d'épaisseur et de 25 m de diamètre, réalisée par gunitage du béton sur le treillis Zeiss-Dywidag (Z-D). *(voir p. 118)*

■ **1926 Usine Fiat « Il Lingotto »** - Turin - Italie. Bâtiment industriel en béton armé à rampes hélicoïdales pour l'accès des voitures aux pistes d'essais en toiture. Architecte : G. Mattè Trucco

■ **1928 Marché couvert de Francfort** - Allemagne. Couverture constituée d'une série de voûtes en berceau long de 36 m de portée accolées (système Z-D). Ingénieurs : F. Dischinger, U. Finsterwalder *(voir p. 119)*

■ **1928 Goetheanum** - Dornach - Suisse. Bâtiment monumental en béton brut qui apparaît comme un bloc monolithique en béton sculpté. Architecte : R. Steiner *(voir p.128)*



Goetheanum[5]

■ **1928 Premier brevet** énonçant correctement les conditions de réalisation **du béton précontraint**, déposé par E. Freyssinet. Avancées significatives dans les techniques de durcissement des bétons. *(voir pp. 57, 59, 79, 88)*

■ **1929 Halles du Boulingrin** - Reims - France. Couverture en berceau parabolique en voile mince de béton armé de 38 m d'ouverture (épaisseur 7 cm). Architecte : E. Maigrot - Ingénieur : E. Freyssinet *(voir p. 119)*

■ **1929 Marché couvert de Leipzig** - Allemagne. Couverture en voile mince, constituée de deux coupoles sur plan octogonal de 66 m de diamètre. Architecte : H. Ritter - Ingénieur : F. Dischinger *(voir p. 119)*

■ **1930 Villa Savoye** - Poissy - France. Maison à ossature en béton armé permettant le plan libre, volume parallélépipédique posé sur de fins pilotis. Architecte : Le Corbusier

■ **1930 Pont du Salginatobel** - Grisons - Suisse. Pont en arc à 3 rotules en béton armé de 90 m de portée, souvent considéré comme le chef-d'œuvre de l'Ingénieur R. Maillart. *(voir pp. 79, 82, 86)*

■ **1930 Le 1er Congrès international du béton armé à Liège** réunit l'élite des ingénieurs concepteurs de structures en béton armé depuis le début du siècle.

■ **1933 Marché d'Algésiras** - Espagne. Coupole surbaissée en voile mince de 48 m de diamètre. Ingénieur : E. Torroja *(voir p. 121)*

■ **1935 Palais 5 du Heysel** - Bruxelles - Belgique. Structure de la couverture : 12 arcs paraboliques à 3 rotules en béton armé de 86 m de portée. Architecte : J. Van Neck - Ingénieur : L. Baes

■ **1935 Barrage Hoover** - Boulder City - USA. Barrage voûte-poids de 221 m de hauteur, de 200 m d'épaisseur à la base et d'un volume 2,5 millions de m³ de béton.



Barrage Hoover[6]

■ **1935 Fronton Recoletos** - Madrid - Espagne. Voiles minces en berceau long de 55 m de longueur. Ingénieur : E. Torroja *(voir p. 121)*

■ **1935 Hangars d'Orvieto** - Italie. Couverture de hangars pour avions par des voûtes en berceau d'environ 45 m de portée en voile nervuré en béton armé. Architecte et Ingénieur : P.L. Nervi

■ **1938 Pont de Oelde** - Westphalie - Allemagne**.** Premier pont à poutres précontraintes (par pré-tension). Portée 32 m. Réalisé par l'entreprise Wayss und Freytag, concessionnaire des brevets de Freyssinet. *(voir p. 61)*



Johnson Wax Building[7]

■ **1939 Johnson Wax Building** - Racine - USA. Bâtiment administratif. Espace central composé de colonnes élancées à champignons supportant une toiture à lanterneaux. Architecte : F. L. Wright

■ **1939 Brevet d'Eugène Freyssinet pour un dispositif d'ancrage de fils de précontrainte en post-tension** par frottement entre un cône mâle en mortier et un cône femelle en béton fretté. *(voir pp. 73, 74)*

■ **1941 Hippodrome de la Zarzuella** - Madrid - Espagne. Couverture de tribune en voile mince en béton armé. Porte-à-faux 12,6 m. Architectes : C. Arniches et M. Dominguer - Ingénieur : E. Torroja. *(voir p. 122)*

■■ **1944 Pont de la Rue du Miroir** - Bruxelles. Premier projet de pont-rail en béton précontraint au monde. Portée 20 m. Ingénieur : G. Magnel. Utilisation du dispositif d'ancrage Blaton - Magnel *(voir p. 65)*

■ **1946 Pont de Luzancy** - France. Tablier composé de 3 poutres en caisson à voussoirs préfabriqués en béton armé assemblés par post-tension. Portée 54 m. Ingénieur : E. Freyssinet *(voir pp. 62, 88)*

■ **1949 Walnut Lane Bridge** - Philadelphie - USA - Premier pont composé de poutres en béton précontraint aux USA. Portée principale : 47 m. Ingénieur : G. Magnel *(voir p. 66)*

■ **1949 Pont de Sclayn** - Pont à 2 travées de 63 m à tablier en caisson précontraint par câbles intérieurs. Premier pont précontraint au monde à poutre continue. Ingénieurs : G. Magnel, A. Birguer *(voir pp. 66, 88, 96)*

■ **1950 RN8 à Leuze-en-Hainaut** - Belgique. Première route en béton armé en Belgique.

■ **1950 Pont construit par encorbellements de Balduinstein**-Allemagne (portée 62 m), suivi de celui de **Worms** (1952 ; 114 m). Post-tension par barres Dywidag de 26 mm. Ingénieur : U. Finsterwalder *(voir pp. 79, 88, 153)*

■ **1951 Laboratoire des rayons cosmiques à Mexico** - Mexique. Couverture en voile mince en forme de paraboloïde hyperbolique (PH). Épaisseur minimale : 2 cm. Architecte et Ingénieur : F. Candela *(voir pp. 123, 129)*



Laboratoire des rayons cosmiques à Mexico[8]

■ **1952 Unité d'habitation de Marseille** - France - Cité radieuse - Immeuble de logements sur pilotis en béton brut (coffrage voliges). Architecte : Le Corbusier *(voir pp. 111, 114, 129)*



Unité d'habitation de Marseille[9]

■ **1952 Création de la FIP** (Fédération internationale de la précontrainte) à Cambridge. Le professeur G. Magnel de l'Université de Gand en est l'un des vice-présidents fondateurs. *(voir p. 69)*

**1953 Création du CEB** (Comité européen du béton) à Luxembourg. Le professeur L. Baes de l'ULB en est l'un des vice-présidents fondateurs. Premières règles internationales de calcul publiées en 1964. *(voir p. 69)*

**1956 Tour de télévision de Stuttgart** - Allemagne - Hauteur totale 217 m Ingénieur : Fritz Leonhardt

**1958 Pavillon Philips à l'Expo 58** - Bruxelles - Belgique - Couverture composée d'un ensemble de voiles minces en PH en béton armé et précontraint. Architectes : Le Corbusier, Iannis Xenakis *(voir pp. 129, 131)*

**1958 Flèche du Génie Civil à l'Expo 58** - Bruxelles - Belgique. Flèche en voile mince plissé de 78 m de porte-à faux. Architecte : J. Van Dosselaer - Sculpteur : J. Moeschal - Ingénieur : A. Paduart *(voir p. 123)*



Flèche du Génie Civil[10]

**1958 CNIT** - Paris La Défense - France - Halle d'exposition triangulaire de 200 m de côté couverte par une voûte, double coque en béton armé, appuyée en 3 points. Ingénieur : N. Esquillan *(voir p. 129)*



CNIT[11]

**1959 Musée S.R. Guggenheim** - New-York - USA - Bâtiment à ossature en béton armé composé principalement d'une rampe hélicoïdale qui s'élargit progressivement. Architecte : F.L. Wright

**1960 Petit Palais des Sports** - Rome - Italie. La Couverture est une coupole nervurée en béton armé préfabriqué de 60 m de diamètre. Architecte : A. Vitellozzi - Ingénieur : P.L. Nervi

**1960 Brasilia** - Brésil - Multiples bâtiments en béton armé aux formes futuristes (Congrès National, Cathédrale…) de l'architecte O. Niemeyer. *(voir p. 130)*

**1961 Barrage de le Grande Dixence** - Valais Suisse - Barrage poids le plus haut du monde : hauteur 285 m, épaisseur à la base : 200 m, volume de béton : 6 millions de m³.

**1962 TWA Flight Centre** - Aéroport J.F. Kennedy - New-York - USA - Couverture en coque en voiles minces en béton armé. Architecte : E. Saarinen *(voir p. 130)*

**1964 Banque Bruxelles Lambert** - Bruxelles - Belgique - Bâtiment à façades en béton architectonique porteur. Architectes : Skidmore, Owings et Merill (G. Bunshaft) *(voir pp. 127, 132, 133)*

**1965 Jonas Salk Institute** - San Diego - USA - Centre de recherche - Ensemble de bâtiments et aménagements extérieurs en béton brut (coffrage lisse). Architecte : L. I. Kahn

**1967 Habitat 67** - Montréal - Canada - Ensembles de logements, empilements de 354 modules parallélépipédiques en béton armé totalement préfabriqués. Architecte : M. Safdie *(voir p. 130)*



Habitat 67[12]

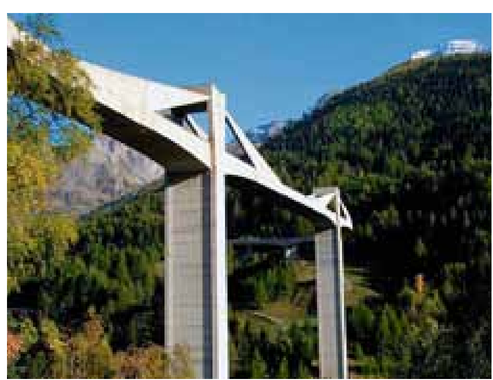
**1973 Ekofisk** - Mer du Nord. Première plateforme pétrolière offshore en béton. Hauteur 71 m. Volume de béton : 75 000 m³. Ingénieurs : CG DORIS (émanation d'entreprises françaises)

**1976 Azuma House** - Osaka - Japon - Maison en voiles et dalles en béton brut (coffrage lisse). Une des premières œuvres de l'architecte T. Ando *(voir p. 131)*

**1976 CN Tower** - Toronto - Canada - Dénomination officielle « Tour nationale du Canada ». Hauteur totale : 553 m. Architecte : J. Andrew

**1977 Pont de Brotonne** - France - Pont haubané. Travée centrale de 320 m en caisson en béton précontraint, record du monde au moment de sa construction. Ingénieur : J. Muller *(voir p. 90)*

**1980 Pont du Ganter** - Valais - Suisse - Pont route extradossé à tablier en poutre en caisson construit par encorbellement. Longueur totale 678 m. Travée principale : 174 m. Ingénieur : Ch. Menn



Pont du Ganter[13]

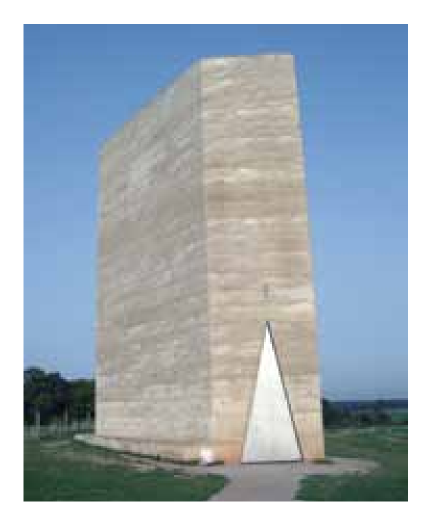
**1990** Japon - Première utilisation pour la construction d'un immeuble d'un **béton auto-plaçant (BAP) ou auto-compactant**, et en 1991 dans les pylônes du pont haubané Shin-kiba Ohashi.

**1994 Gare Lyon-Saint-Exupéry TGV** (anciennement Satolas-TGV). Couverture des accès aux quais par un ensemble d'arcs imbriqués en béton blanc. Architecte : S. Calatrava *(voir p. 130)*

**1997 Pont de la Confédération** - Canada - Pont route en caisson en béton précontraint. Longueur totale 12,9 km. Travée principale : 250 m. Ingénieur : J. Muller

**1997 Passerelle de Sherbrooke** - Canada. Treillis hybride de 60 m de portée construit par l'entreprise Bouygues. Première application des Bétons à Ultra Hautes Performances(BUHP).

**2007 Chapelle Saint-Nicolas-de-Flüe** - Mechernich - Allemagne. Monolithe creux en béton armé de 12 m de haut et dont la base est un pentagone irrégulier. Architecte : P. Zumthor



Chapelle Saint-Nicolas-de-Flüe[14]

**2010 Burj Khalifa** - Dubaï - Émirats Arabes Unis. La structure des 600 premiers mètres de cette tour la plus haute du monde est en béton armé. Record du monde de hauteur de pompage du béton.

**2010 1111 Lincoln Road** - Miami - USA. Bâtiment ouvert à usages multiples (parkings, commerces...) à structure apparente en béton. Architectes : Herzog & de Meuron *(voir p. 131)*

## RÉFÉRENCES

[1] Crédit photographique : FBM Studio Ltf. - David P. Billington, *Robert Maillart and the art of reinforced concrete*. The MIT Press, 1990.
[2] Crédit photographique : A. Hellebois
[3] fr.structurae.de - ©2011 Inge Kanakaris - Wirtl
[4] J. Badovici. Grandes Constructions. Béton Armé, Acier, Verre. Paris : Albert Morancé (s.d.) (*ca* 1930)
[5] commons.wikimedia.org ©2007 Bagradian
[6] www.laboiteverte.fr
[7] racinepost.blogspot.be
[8] Crédit photographique : Bruce M. White - Maria E. Garlock and David P. Billington, *Félix Candela: Engineer, Builder, Structural Artist.* Princeton University Art Museum - Yale University Press, 2008.
[9] Crédit photographique : M. Provost
[10] Annales des Travaux publics de Belgique, 1958, N°1
[11] melisaki.tumblr.com
[12] Crédit photographique : 2006 Sarah Donikian - Le monde en images, CCDMD
[13] Crédit photographique : 2011 Nicolas Amherd - www.valais-community.ch
[14] Crédit photographique : Ch. Nys

# 1. LES ORIGINES DU BÉTON ARMÉ : DE L'EXPÉRIMENTATION À LA DIFFUSION

L'avènement du béton armé, au sens moderne du terme, est rendu possible au 19ème siècle grâce à la production industrielle de ciment artificiel et aux produits finis en fer et acier, barres rondes et plats métalliques principalement. Cependant, déjà au temps des Romains, un béton de masse non armé était mis en œuvre mais il s'agissait exclusivement d'un mélange à base de liant naturel (chaux, ciment naturel, etc.). La période allant de 1890 à 1914 constitue une phase charnière pour l'essor du béton armé comme matériau de construction. Les progrès accomplis pour en faire un matériau adéquat de structure portante sont certainement stimulés par le système de brevets. L'un des acteurs principaux de cette course aux brevets est François Hennebique (1842-1921). Grâce à son système technique, à son organisation commerciale et à sa promotion publicitaire (notamment via sa revue « Le Béton Armé »), il a su s'imposer dans le paysage belge et international de la construction en béton armé. Son œuvre est accessible grâce aux archives du bureau Hennebique, conservées depuis 1989 à l'Institut Français d'Architecture à Paris.

## DU BÉTON DES ROMAINS AUX DÉBUTS DU BÉTON ARMÉ

**Bernard Espion**

### LIANTS ET BÉTONS DANS L'ANTIQUITÉ

Toute histoire du béton fait immanquablement remonter l'origine de ce matériau à la construction romaine, et en particulier à l'un des chefs-d'œuvre de la construction antique : le Panthéon d'Agrippa à Rome, terminé sous le règne de l'empereur Hadrien en 123 AD.
De quoi s'agit-il ? D'une construction en maçonnerie « concrète » non armée recouverte par un dôme alvéolé de 43 m de diamètre intérieur. Il faudra attendre 1436 avec l'achèvement du dôme de Sainte Marie de la Fleur à Florence pour qu'un dôme en maçonnerie (de briques) présente un diamètre plus grand, et 1913 avec la Halle du centenaire à Wroclaw pour qu'une couverture en béton armé dépasse cette ouverture. S'agit-il pour autant de béton ? Oui et non. Tout d'abord non, parce que le liant de cette maçonnerie n'est pas du ciment, comme dans nos bétons modernes, mais de la chaux. Ensuite, la technique présentait des différences, car les Romains constituaient la maçonnerie en agglomérant les agrégats ou les moellons au mortier de chaux et de sable pour obtenir une concrétion, alors que de nos jours c'est l'ensemble des matériaux qui est malaxé préalablement avant d'être mis en place. Mais comme similitude avec nos bétons modernes, il y a lieu de noter que cette technique de construction nécessitait l'utilisation de moules, coffrages et cintres destinés à donner la forme aux éléments constructifs et à soutenir la maçonnerie jusqu'à ce que celle-ci ait acquit une résistance suffisante. Ce béton des Romains nécessitait aussi probablement la mise en œuvre d'un serrage mécanique par damage ou piquage. Enfin, il s'agit de maçonnerie non armée ; l'utilisation d'armature par les Romains semble exceptionnelle.
Revenons au liant de cette maçonnerie : la chaux. La façon traditionnelle d'obtenir de la chaux est de cuire de la pierre calcaire ($CaCO_3$, pierre à chaux) dans un « four à chaux » où la température atteint 850°. Le résultat de cette calcination est la chaux vive (CaO, oxyde de calcium), une pierre pulvérulente qu'il est dangereux de manipuler et que l'on « éteint » en l'aspergeant d'eau. Le contact de l'eau et de la chaux vive provoque la dislocation des blocs, une augmentation de température, et un gonflement important, qu'on appelle le foisonnement. La chaux éteinte se présente naturellement sous la forme d'une farine pulvérulente qui peut être conditionnée et transportée. Le mortier préparé en mélangeant cette chaux avec du sable et de l'eau ne va normalement durcir qu'à l'air, sous l'effet de la carbonatation, et non sous eau, sauf cas particulier. Et ce durcissement est très lent. Les chaux qui ne durcissent qu'à l'air sont appelées chaux « aériennes » ; celles qui durcissent sous l'eau « chaux hydrauliques ».

Vitruve nous rapporte dans ses « Dix livres d'architecture » au 1er siècle avant notre ère que les Romains connaissaient la façon de rendre hydraulique un mortier à base de chaux aérienne lorsque l'application le justifiait. Au livre 2, Vitruve cite l'adjonction de tuileau, c'est-à-dire d'argile torréfiée. Au livre 5, il parle d'adjonction de terre venant de Pouzzoles, c'est-à-dire la région volcanique des champs

Phlégréens près de Naples. Il s'agit également d'une argile torréfiée à haute température, mais résultant des éruptions volcaniques. Cette façon de rendre hydraulique les chaux aériennes avec les cendres volcaniques, les Grecs l'avaient probablement découvert bien avant les Romains avec les cendres volcaniques de Santorin. Mais quoi qu'il en soit, les gisements naturels de ces matières que l'on appelle aujourd'hui « pouzzolaniques » sont rares et ces matières ont toujours été très chères. Et il n'est pas du tout établi que des matières pouzzolaniques aient été utilisées pour composer le béton du Panthéon. La maçonnerie concrète, ou agglomérée, semble avoir disparu avec les Romains, sans qu'on sache très bien pourquoi.

## LA LENTE DÉCOUVERTE DU CIMENT PORTLAND

À la Renaissance, Vitruve est remis à l'honneur. Mais au 18ème siècle, on ne sait toujours pas ce qui rend certaines chaux plus hydrauliques que d'autres. Bélidor (1698-1761) dans son « Architecture hydraulique » (1737-1753), traité d'ingénierie de référence jusqu'au début du 19ème siècle, ne fait que reproduire les règles de Vitruve, avec les assertions fausses de ce dernier, comme celle qui voudrait que la meilleure chaux soit produite avec les pierres calcaires les plus pures. Beaucoup de savants naturalistes, dans divers pays, essayent de comprendre ce qui fait ce que l'on appelle « la force des chaux ».

À titre d'exemple, l'ingénieur anglais John Smeaton (1724-1792) travaillant à la reconstruction du phare sur les roches d'Eddystone (au sud de Plymouth) en 1756, ayant besoin d'un mortier faisant prise rapidement, fait des expériences systématiques avec des chaux et découvre, contrairement à ce qu'affirmait Vitruve - et l'on sait que Smeaton disposait d'une copie de Bélidor - que les chaux les plus hydrauliques ne sont pas faites avec les calcaires les plus purs, mais avec des roches marneuses, c'est-à-dire contenant un peu d'argile. Il obtient ainsi un mortier qui est, selon ses dires, « plus résistant que la meilleure pierre de Portland ». Pourquoi ce nom qui sera si important dans l'histoire du ciment ? La pierre calcaire de Portland ne permet pas de faire de la chaux ou du ciment, mais c'est, en Angleterre, la roche dont on façonne la pierre de taille pour réaliser la maçonnerie des constructions de prestige.

Cependant, il faut attendre les progrès de la chimie pour permettre au français Louis Vicat (1786-1861) d'établir en 1818 ce que Smeaton avait seulement entrevu, à savoir qu'en l'absence d'argile ou de marne dans la roche calcaire, on pouvait réaliser de bonnes chaux hydrauliques en mélangeant artificiellement des roches argileuses et du calcaire, et en soumettant le tout à cuisson après homogénéisation. Vicat est un ingénieur des Ponts et Chaussées. Entre 1812 et 1822, il est en charge de la construction du Pont de Souillac sur le Lot (Dordogne). Ceci l'amène à devoir réaliser des piles en rivière. La lente construction du pont à cause de la faiblesse des crédits lui permet de mettre son temps à profit pour étudier l'hydraulicité des chaux. Et c'est lui qui comprend que l'hydraulicité est fonction du poids des éléments acides, c'est-à-dire l'argile Alumine ($Al_2O_3$) et Silice ($SiO_2$), par rapport au poids des éléments basiques (la chaux) dans la roche ou dans le mélange artificiel soumis à cuisson. Ce rapport, c'est l'indice d'hydraulicité i et pour qu'une chaux soit hydraulique, capable de faire prise sous eau, il faut que i soit supérieur à 0,28. Il faudra encore attendre 1884 pour que le chimiste Henry Le Chatelier (1850-1936) en donne la raison. Vicat publie ses résultats en 1818, mais ne prend pas de brevet. D'ailleurs, au début ses résultats ne font pas l'unanimité en France.

Mais en Angleterre, certains en voient tout de suite l'utilité commerciale. Déjà en 1796, un vicaire anglican du nom de James Parker (*ca* 1750 - *ca* 1825), qui avait eu connaissance des résultats de Smeaton publiés seulement en 1791, avait observé qu'il pouvait obtenir un ciment naturel à partir de roches calcaires à haute teneur en Alumine provenant de l'île de Sheppey (embouchure de la Tamise). Produit qu'il baptise « ciment romain ». Il s'agit donc d'un ciment « naturel », qui est plutôt une forme de chaux hydraulique naturelle, qui va rester très en vogue pendant tout le 19ème siècle. Mais sa production dépend de gisements en quantités limitées où l'on trouve des roches calcaires avec la bonne proportion d'argile. Le Boulonnais en est une, mais également le Tournaisis, où l'on produit du ciment romain pendant tout le 19ème siècle, la première cimenterie ne s'y installant qu'au début du 20ème siècle. Le premier brevet de fabrication du ciment artificiel (par voie humide) date de 1824 ; il est pris par un briquetier de Leeds du nom de Joseph Aspdin (1779-1855). Lui obtient réellement après cuisson des nodules vitrifiés - qui sont ce que l'on appellerait maintenant du clinker - qui après broyage deviennent cette poudre grise que l'on appelle



Figure 1 : La barque de Lambot (1849)[1]

du ciment. Matière que lui baptise « Ciment Portland » en probable allusion commerciale à la fameuse pierre calcaire utilisée en Angleterre en maçonnerie de taille de haute qualité. Cependant, Aspdin avait maintenu secret dans son brevet un élément clé, qui est la température de clinkérisation, 1450°C, beaucoup plus élevée que celles nécessaires pour produire des chaux. Si bien que des années plus tard, la fabrication du ciment demeurait plein de mystère. On attribue enfin au producteur de ciment portland et chimiste anglais Isaac Johnson (1811-1911) d'avoir breveté scientifiquement la production de clinker en 1844. Les premières cimenteries productrices de ciment artificiel Portland apparaissent sur le continent vers 1850, et la première en Belgique à Cronfestu en 1872.

## DÉBUTS DU BÉTON ARMÉ

Maintenant que nous avons au milieu du 19ème siècle la chaux hydraulique, le ciment naturel (ciment romain) ou le ciment artificiel, passons à l'association avec l'armature, qui peut être le fer doux ou l'acier, même à cette époque. Traditionnellement, l'histoire française du béton armé fait remonter la première construction en béton armé (ou ciment armé comme on disait alors) à la barque de Lambot en 1848. Joseph Louis Lambot (1814-1887) est un agriculteur à Brignolles (Var) qui imagine, pour canoter sur l'étang de sa propriété à Miraval, de réaliser une barque constitué d'un treillage en fer enduit de mortier.

Cette barque, qui existe toujours (deux exemplaires ont été réalisés), est exposée à la seconde Exposition universelle, celle de 1855 à Paris, mais personne ne la remarque (Fig. 1). L'heure n'est donc pas encore au ciment armé. En fait, il est probable que l'idée d'associer du mortier de chaux ou de ciment avec une armature en fer va naître indépendamment dans l'esprit de quelques précurseurs dans divers pays, et pour les planchers, la résistance au feu est souvent un avantage mis en avant.

En 1851, un manufacturier de produits chimiques d'origine lyonnaise, François Coignet (1814-1888) vient s'établir à Saint-Denis, dans la région de Paris. Il se fait construire une maison en s'inspirant de la technique traditionnelle du pisé (c'est-à-dire d'argile damée) remise en l'honneur depuis la fin du 18ème siècle par des architectes tels que François Cointeraux, Jean-Baptiste Rondelet (Fig. 2) et François Martin. Mais dans les murs de sa maison, l'argile est remplacée par un béton de chaux aggloméré de mâchefer (c'est-à-dire de cendre de houille - on dirait aujourd'hui du laitier). Et la terrasse de sa maison est entièrement en béton aggloméré, mais renforcée de poutrelles en I en fer. Cet exemple est souvent cité comme application du béton armé, mais il s'agit vraiment d'une application isolée, car l'industriel cherche d'abord à exploiter commercialement le caractère monolithique du béton non armé. En 1861, il crée une filiale pour exploiter les brevets du béton aggloméré et déploie une grande activité commerciale dans le domaine des travaux publics. Le phare de Port Saïd en 1869 est l'un de ses derniers grands ouvrages car son entreprise périclite en 1872.

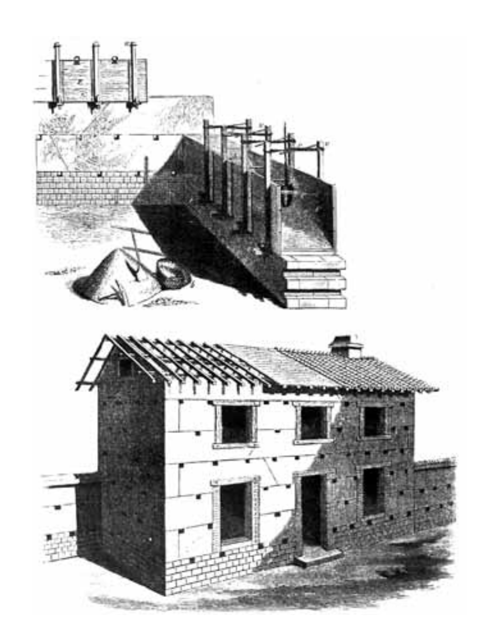
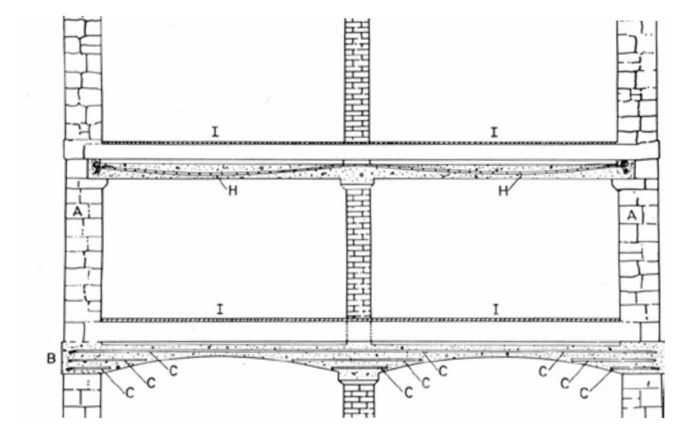


Figure 2 : Technique traditionnelle du pisé[2]

En Grande Bretagne, on reconnaît un inventeur isolé du béton armé du nom de William B. Wilkinson (1819-1902), de Newcastle. Wilkinson est l'un de ces nombreux fabricants de petits éléments décoratifs ou de construction, non armés, en « pierre artificielle ». En 1854, il dépose un brevet pour la construction de planchers en béton renforcés d'armatures, qui apparaît beaucoup plus développé que celui de Coignet quant à la disposition et l'ancrage des armatures (Fig. 3). On n'en connaît qu'une seule application : un cottage construit à Newcastle en 1865 et dont la démolition quelque 90 années plus tard laisse apparaître l'armature constituée de câbles de mine réemployés. La disposition des armatures préfigure des dispositions correctes qui ne seront retrouvées que 40 ans plus tard. Mais cette invention et cette application passent parfaitement inaperçues.

Figure 3 : Brevet déposé par Wilkinson pour des planchers en béton armé[3]




Aux États-Unis, William Ward (1821-1901), un ingénieur mécanicien, qui a probablement connaissance du béton aggloméré de Coignet, se construit en 1873 à Port Chester (NY) une maison de 1200 m² entièrement en béton dont tous les éléments sont renforcés d'armatures métalliques, suivant une disposition indiquant une parfaite compréhension, en avance sur son temps, du rôle de l'armature. Il s'agit à nouveau d'une expérience isolée. L'heure n'est pas encore au béton armé aux USA.

Revenons en Europe, quoiqu'avec un américain. Thaddeus Hyatt (1816-1901), un juriste New Yorkais de formation, effectue à Londres en 1877, dans le célèbre laboratoire d'essais des matériaux de David Kirkaldy, des expériences novatrices et très intéressantes de résistance au feu d'éléments en béton armé, dans laquelle l'armature est logiquement disposée. Les résultats qu'il publie à compte d'auteur ne seront reconnus que beaucoup plus tard.

Enfin, dans nos précurseurs des années 1870, il faut citer Joseph Monier (1823-1906), qui est un jardinier originaire d'Uzès (Gard), arrivé à Paris dans les années 1840, horticulteur paysagiste en 1849. Dans les années 1860, alors que les rocailles sont à la mode, il commence à réaliser des éléments en ferrociment, un peu à l'instar de Lambot. Son premier brevet, en 1867, concerne des bacs à fleurs ou des caisses pour les orangers des Tuileries (Fig. 4). Il va rapidement multiplier les additifs à son brevet initial de 1867 dans les domaines les plus variés : tuyaux et bassins fixes (1868), ponts et passerelles (1873) et poutres droites pour planchers et terrasses (1878). Il semble cependant que Monier n'ait jamais réellement perçu le rôle exact de l'armature. Il y eu quelques applications de ses brevets, mais la commercialisation de ceux-ci en France dans les années 1870 et 80 n'a jamais décollé.

À la fin des années 1870, la construction en béton armé n'existe donc toujours pas. Ce n'est que dans les années 1880 qu'elle va tout doucement démarrer.

C'est ici qu'il faut, pour la Belgique et la France, mentionner le rôle prépondérant de François Hennebique (1842-1921), petit entrepreneur originaire d'Arras, mais qui vient s'établir en Belgique, y dépose son premier brevet en 1886 et réalise la première construction en béton armé en Belgique : un plancher incombustible pour une villa à Lombardzijde en 1889. À partir de 1892, en prenant comme argument commercial de promotion du béton armé « Plus d'incendie désastreux » par rapport

aux constructions métalliques, F. Hennebique va construire progressivement un empire du béton armé qui occupera une position prééminente pendant au moins quinze ans dans les pays latins, en ce y compris la Belgique. Dans les pays germaniques, Empire Allemand et Empire austro-hongrois, de même qu'aux Pays-Bas, les débuts du béton armé sont associés au nom de Monier. En effet, en 1885, Monier s'est fait dépossédé des droits de ses brevets en particulier par un ingénieur nommé Gustave Wayss (1851-1917), qui a probablement vu une illustration du système Monier lors d'une Exposition internationale à Anvers en 1885 et qui en a perçu le potentiel. Recherchant des applications en Allemagne, Wayss parvient à convaincre en 1886 l'ingénieur de l'état prussien en charge de la construction du *Reichstag*, Mathias Koenen (1849-1924), d'y utiliser des planchers en béton armé. C'est cette application qui lance le béton armé en Allemagne, où les débuts, vers 1887, sont donc un peu antérieurs à ceux de Hennebique en Belgique. Très longtemps en Allemagne, le béton armé est appelé *Monierbau* en référence aux brevets initiaux, même si le renforcement du béton ne ressemble plus en rien à celui décrit dans ces brevets et que Monier n'en retire aucun profit. Revenons en France dans les années 1890.

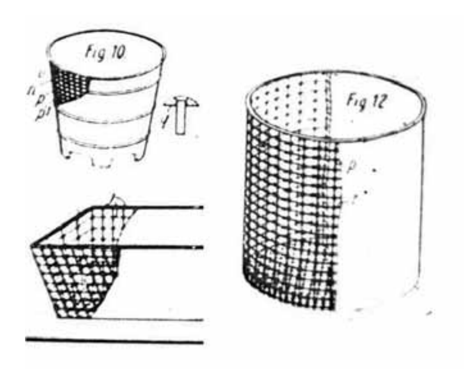



Figure 4 : Brevet déposé en 1867 par Monier pour la fabrication de pots et caisses[4]

Certes, Hennebique y jouit d'une position dominante, mais il n'est pas le seul à promouvoir le béton armé. Il existe à cette époque quantité de systèmes brevetés décrivant la façon d'armer les poutres. Il est difficile de nos jours d'imaginer cela tant la conception du béton armé et le détail de l'armature sont codifiés par des prescriptions règlementaires. Mais rien de tel au début du béton armé. Il n'existe que très peu d'essais et pas de théorie : tout est à inventer. S'il faut pointer un nom parmi les concurrents de Hennebique, il faut retenir celui d'Edmond Coignet (1857-1888), le fils de François Coignet, qui y va également de son système d'armaturage dans un brevet de 1892, qui passe pour

Figure 5 : Exemple de systèmes en béton armé brevetés présentés par Christophe[5]

avoir été le premier à utiliser la préfabrication dès 1892 pour le casino de Biarritz et à qui l'on doit en 1894, en collaboration avec Napoléon de Tedesco (1848-1922), responsable du bureau d'études de l'entreprise Coignet, l'énoncé du premier modèle de calcul rationnel de fonctionnement d'une section de poutre en béton armé soumise à flexion.
La décennie 1890 est vraiment celle du lancement de la construction en béton armé. Au terme de celle-ci, en 1899, l'ingénieur des Ponts et Chaussées belge Paul Christophe (1870-1957) rédige un véritable état de l'art concernant cette technique, recensant brevets, applications, essais disponibles et méthodes de calcul. Le livre qu'il publie en 1902 avec ses articles écrits en 1899 constitue le premier véritable traité de béton armé (Fig. 5). Le béton armé est aussi abondamment utilisé pour les constructions de l'Exposition universelle de Paris de 1900 ; le voilà donc bien lancé comme « le » matériau de construction du 20ème siècle.

## PREMIÈRE GÉNÉRATION DE BÉTON ARMÉ : LE RÈGNE DES BREVETS, ENTRE SYSTÈMES COMMERCIAUX ET NORMES NAISSANTES

**Armande Hellebois**

### INTRODUCTION

Pour conserver les structures en béton armé réalisées au tournant du 20ème siècle, il est indispensable d'étudier en détail leurs caractéristiques techniques et technologiques pour ensuite intervenir, si nécessaire, de façon adaptée et limitée. En effet, les constructions en béton armé de cette période diffèrent des ouvrages postérieurs pour plusieurs raisons. La raison principale est que le béton armé était régi par l'utilisation d'un foisonnement de systèmes commerciaux, majoritairement brevetés[1]. La compétition entre les constructeurs a encouragé le développement du matériau et a stimulé les innovations. De plus, les structures datant d'avant la Première Guerre mondiale sont gouvernées par des méthodes empiriques de dimensionnement et d'exécution liées à chaque constructeur (entrepreneurs de travaux, architectes ou ingénieurs). Le rôle des brevets, déposés en majorité par des praticiens, est donc déterminant dans l'essor du béton armé au tournant du 20ème siècle. L'apparition des premières règlementations entre 1904 et 1923 va ensuite remplacer peu à peu l'utilité des systèmes brevetés.

### LÉGISLATION BELGE SUR LES BREVETS EN VIGUEUR AVANT 1914

Sommairement, un brevet peut se définir comme un titre de propriété intellectuelle qui permet à celui qui le détient d'en avoir le monopole et d'en tirer du profit. Les effets positifs d'un brevet sont de stimuler la recherche et l'invention, de diffuser l'innovation et de protéger l'inventeur[2]. L'invention et l'innovation, en effet, sont deux concepts complémentaires. Selon Schumpeter, l'invention est synonyme du processus de création tandis que l'innovation est le mécanisme qui transforme la nouveauté, c'est-à-dire soit le concept abstrait soit un produit encore à l'état de prototype expérimental, en produit industriel et commercialisable. Un brevet représente alors un état intermédiaire entre invention et innovation[3].

La loi sur les brevets d'invention publiée en 1854 dans le Moniteur Belge sera d'application en Belgique jusqu'à la Première Guerre mondiale (à l'exception des articles 7 et 22 qui ont subi des changements mineurs en 1857). Ce texte législatif, contenant 27 articles, définit donc les droits et obligations d'un détenteur de brevet (Fig. 1). Trois types de brevets sont alors possibles : **le brevet d'invention, de perfec**tionnement et d'importation (art. 1) (Fig. 1). Ils donnent tous les mêmes droits et obligations au propriétaire de brevets. La durée de validité des brevets est de vingt ans, et le propriétaire de brevets doit s'acquitter d'une taxe annuelle (art. 3) (Fig. 1). Les droits du propriétaire sont de pouvoir exploiter son invention et de poursuivre en justice toute personne qui contre-façonnerait cette invention (art. 4) (Fig. 1). Cependant, aucun examen préalable du contenu n'avait lieu au moment de la soumission du brevet (art. 2) (Fig. 1). Par conséquent, ni l'originalité ni la faisabilité pratique du brevet n'étaient vérifiées par le Ministère de l'Économie et du Travail, instance chargée, à l'époque, de recueillir et de conserver les brevets. C'est pourquoi

LE MONITEUR BELGE,

JOURNAL OFFICIEL.

24e ANNÉE. JEUDI, 25 MAI 1854. No 145.

LOI sur les brevets d'invention.

LÉOPOLD, Roi des Belges,

A tous présents et à venir, SALUT.

Les Chambres ont adopté et Nous sanctionnons ce qui suit :

Art. 1er. Il sera accordé des droits exclusifs et temporaires, sous le nom de brevet d'invention, de perfectionnement ou d'importation, pour toute découverte ou tout perfectionnement susceptible d'être exploité comme objet d'industrie ou de commerce.

Art. 2. La concession des brevets se fera sans examen préalable, aux risques et périls des demandeurs, sans garantie, soit de la réalité, soit de la nouveauté ou du mérite de l'invention, soit de l'exactitude de la description, et sans préjudice des droits des tiers.

Art. 3. La durée des brevets est fixée à vingt ans, sauf le cas prévu à l'art. 14 ; elle prendra cours à dater du jour où aura été dressé le procès-verbal mentionné à l'art. 18.

Il sera payé, pour chaque brevet, une taxe annuelle et progressive ainsi qu'il suit.

| | | |
|---|---|---|
| 1re année | ...... | 10 francs |
| 2e — | ...... | 20 — |
| 3e — | ...... | 30 — |

et ainsi de suite jusqu'à la 20e année, pour laquelle la taxe sera de 200 francs. La taxe sera payée par anticipation et, dans aucun cas, ne sera remboursée.

Il ne sera point exigé de taxe pour les brevets de perfectionnement, lorsqu'ils auront été délivrés au titulaire du brevet principal.

Art. 4. Les brevets confèrent à leurs possesseurs ou ayants droit, le droit exclusif :

a. D'exploiter à leur profit l'objet breveté ou de le faire exploiter par ceux qu'ils y autoriseraient ;

b. De poursuivre devant les tribunaux ceux qui porteraient atteinte à leurs droits, soit par la fabrication de produits, ou l'emploi de moyens compris dans le brevet, soit en détenant, vendant, exposant en vente ou en introduisant sur le territoire belge un ou plusieurs objets contrefaits.

Figure 1 : Articles 1 à 4 de la loi belge sur les brevets d'invention publiée en mai 1854[6]

on remarque, d'une part, que la qualité des brevets est très variable et, d'autre part, que nombre de brevets déposés n'ont eu qu'un intérêt, scientifique ou commercial, mineur. Cette absence d'inspection était également courante en France alors qu'aux États-Unis ou en Allemagne, les brevets suivaient une procédure plus stricte[4]. Le nombre de brevets déposés en Belgique jusqu'en 1914 est élevé (autour de 11 000 brevets) comparé aux états voisins et compte tenu du nombre d'habitants[3]. Cela s'explique notamment par l'intensité de l'activité économique belge au 19ème siècle (la Belgique était alors une des premières puissances industrielles mondiales) et par son système relativement libéral d'accès à la prise de brevet.

## LES PARTICULARITÉS DU BÉTON ARMÉ PATENTÉ

Avant la domination des normes sur le béton armé, c'est-à-dire avant le déclenchement de la Première Guerre mondiale, le béton armé est régi par une multitude de systèmes. Un système est défini comme une disposition particulière d'éléments métalliques noyés dans une matrice de béton[5]. Les renforcements métalliques reprennent principalement les efforts de traction et le béton les efforts de compression. L'inventeur d'un système spécifie le plus souvent le but et l'utilisation de son système. L'élément structural est donc clairement établi dans le brevet et l'auteur brevète souvent chaque élément séparément. Le nom de l'inventeur est ensuite

Royaume de Belgique



BREVET D'INVENTION

LE MINISTRE DE L'INDUSTRIE ET DU TRAVAIL,

*Vu la loi du 24 mai 1854 ;*

*Vu le procès-verbal dressé le* 9 Janvier 1908 *à* 12 *heures* 21,

*au Greffe du Gouvernement provincial du Brabant,*

ARRÊTE :

No 20505

**Article 1er.** — *Il est délivré à* Mr L. Monnoyer et fils à Bruxelles, rue Gachard, 59, représentés par M. Kirkpatrick, à Bruxelles,

*un brevet d'invention*

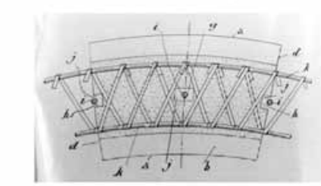
*pour :* Blocs ou claveaux en béton pour la construction de puits ou ouvrages quelconques analogues.

**Article 2.** — *Ce brevet lui est délivré sans examen préalable, à ses risques et périls, sans garantie soit de la réalité, de la nouveauté ou du mérite de l'invention, soit de l'exactitude de la description, et sans préjudice du droit des tiers.*

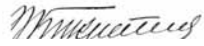
*Au présent arrêté demeurera joint un des doubles de la spécification de l'invention (mémoire descriptif et dessins) signés par l'intéressé et déposés à*

REVENDICATION.

Des blocs ou claveaux en béton pour la construction de puits ou ouvrages analogues, caractérisés par ce que leurs faces internes et externes, légèrement arquées dans le sens longitudinal, ont la forme de doubles queues d'aronde présentant entre elles, en haut et en bas, des espaces de forme appropriée pour emboîter deux queues d'aronde semblables juxtaposées, en substance comme ci-dessus décrit et représenté sur les dessins ci-joints.



pon. de MM. L. MONNOYER & Fils.



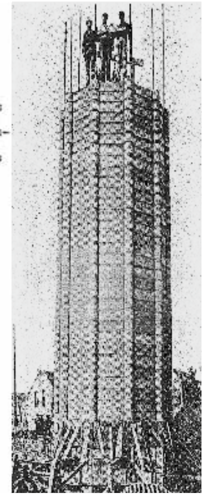


Figure 2 : Détails des différents constituants d'un brevet d'invention déposé par Léon Monnoyer et Fils en 1908 pour « Blocs ou claveaux en béton pour la construction de puits et ouvrages analogues »[6] ; illustration d'une cheminée réalisée avec ce système[7]

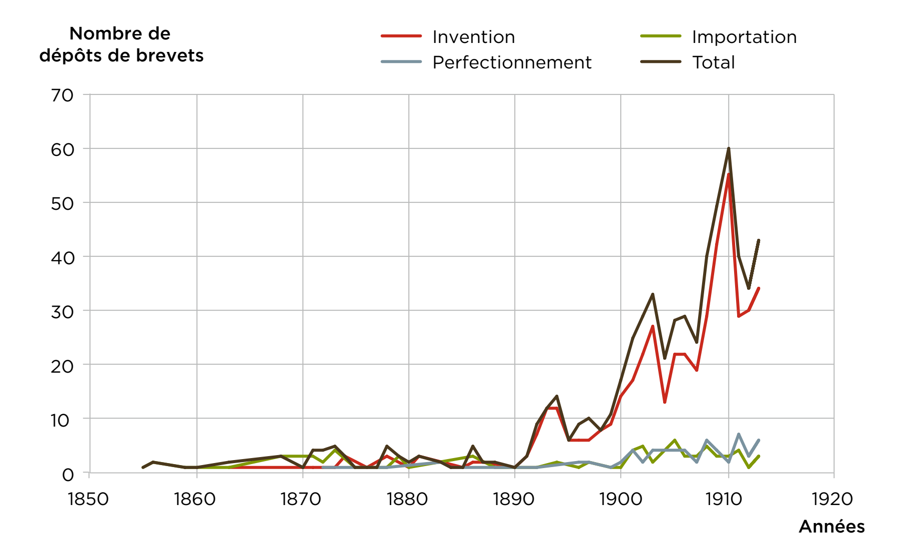



Figure 3 : Nombres et types de brevets traitant du béton armé déposés en Belgique avant 1914

associé au système pour l'application industrielle. Chaque brevet contient, outre le nom de l'inventeur et éventuellement celui du soumissionnaire, la date et le titre de l'invention, une description détaillée de celle-ci en ce compris des illustrations et schémas explicatifs et, finalement, en conclusion un résumé de la découverte de l'auteur (Fig. 2).

Ces systèmes brevetés sont nombreux et, au stade actuel de nos recherches, nous en avons répertorié quelques 608 déposés en Belgique entre 1855 et 1913 inclus au sujet du béton armé au sens large du terme (Fig. 3). Comparativement, l'Allemagne acceptait environ 300 soumissions de brevets sur le béton armé en 1903 (contre 242 pour la Belgique en 1903) et la France recueillait autour de 263 brevets sur ce même thème avant 1906 (contre 290 pour la Belgique avant 1906)[8]. En Belgique, le nombre de brevets d'invention est nettement supérieur au nombre déposé dans le registre du perfectionnement ou de l'importation (Fig. 3). Cela s'explique notamment par le fait qu'une personne étrangère pouvait aisément breveter en Belgique, via un agent local domicilié dans le pays. L'utilité d'un brevet d'importation était donc limitée. De plus, on remarque distinctement sur la Fig. 3 l'augmentation rapide de la production des brevets dès l'année 1890 mais surtout à partir de l'année 1900 ainsi qu'un pic de soumission de brevets vers 1910. Cette tendance est observable également dans le nombre de publications traitant du béton armé[9] et dans le nombre de constructions, ou de projets de constructions, en béton armé à Bruxelles repris dans notre inventaire. En fait, le béton armé, tel qu'on le définit aujourd'hui, n'existe quasiment pas dans le secteur de la construction avant 1890. L'augmentation rapide de dépôts de brevets vers 1910 est probablement due à une conjoncture favorable au progrès du béton armé. La formation de groupes de travail sur sa fabrication, son comportement, son utilisation a donné lieu aux publications des premières normes nationales et donc à une certaine publicité et une confiance gran-

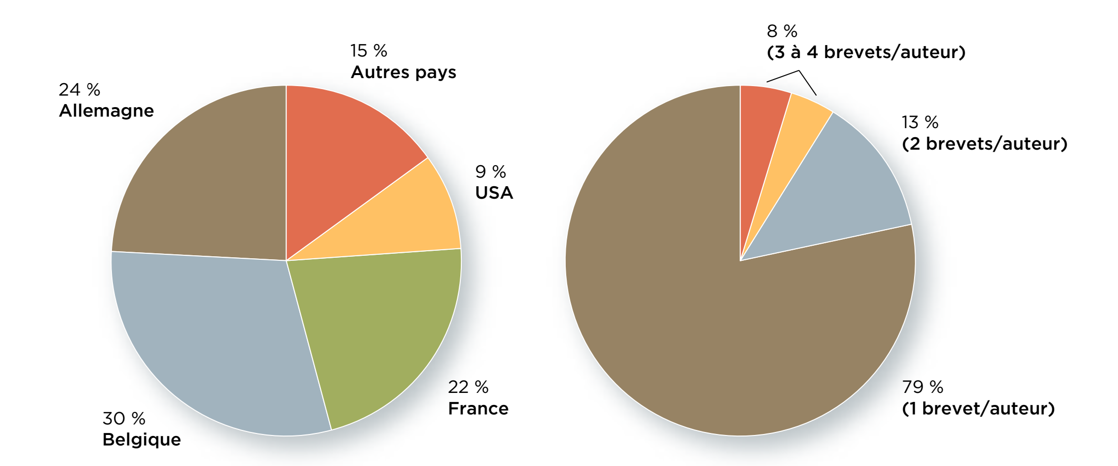



Figure 4 : À gauche, proportions de brevets selon l'origine nationale ; à droite, statistiques du nombre de brevets déposés par auteur

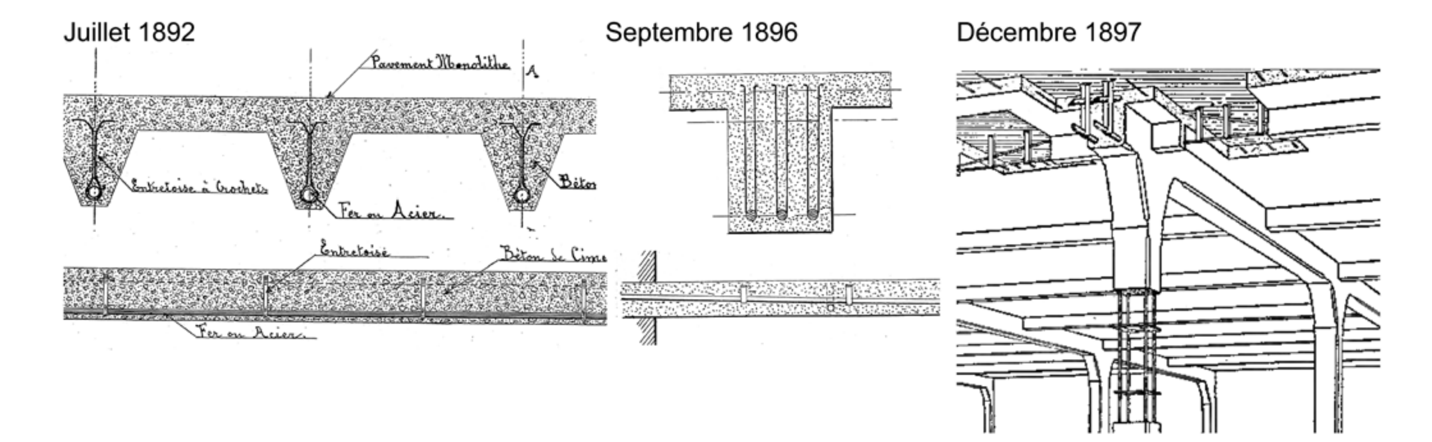



Figure 5 : Détails des modifications de la poutre dans deux de ses brevets[6] et système typique colonne-poutre-dalle utilisé par Hennebique dès 1897

dissante dans le matériau. De plus, Bruxelles a accueilli l'Exposition universelle de 1910, ce qui a peut-être aussi stimulé l'activité industrielle, puisque cet événement était l'occasion à l'époque d'un important transfert de technologies et de savoir-faire.

En ce qui concerne la nationalité des auteurs de brevets, 30 % sont d'origine belge, 24 % d'origine allemande, 22 % d'origine française, 9 % américains et les 15 % restant de diverses nationalités (Fig. 4). Par ailleurs, 79 % des auteurs n'ont déposé qu'un seul brevet et 8 % de soumissionnaires ont déposé plus de trois brevets, ce qui montre l'intérêt engendré par l'introduction du béton armé dans le secteur de la construction mais aussi la variété d'auteurs (Fig. 4). Au début du 20ème siècle, les auteurs de brevets sont principalement des personnes individuelles et non pas des groupes employés par des laboratoires de recherches ou des compagnies internationales[10]. La formation professionnelle de ces quelques 337 auteurs est difficilement identifiable au travers de la seule lecture des brevets. Cependant, il semblerait que la majorité soit probablement des entrepreneurs, bien plus que des architectes ou des ingénieurs. Ceux-ci se sont intéressés au nouveau matériau plus tardivement que les entrepreneurs[11]. Comme Christophe l'écrit en 1899 : « Pendant que les ingénieurs doutaient et que les savants calculaient, les inventeurs ont appliqué et perfectionné, et l'expérience, grâce à eux, s'augmente tous les jours de faits nouveaux »[12].

## QUELQUES RÉALISATIONS ET APPLICATIONS PRATIQUES EN BELGIQUE

Grâce au recensement d'un inventaire des ouvrages en béton armé implantés en région bruxelloise et construits avant 1914 (plus de 500 biens à l'inventaire jusqu'à présent) ainsi que par le relevé détaillé des brevets, il apparait que le système du français François Hennebique (1842-1921) domine nettement le marché belge du béton armé avant la Première Guerre mondiale. En effet, il a breveté dix-sept inventions ou perfectionnements en Belgique et est impliqué dans plus de 80 % des projets en béton armé à Bruxelles avant 1914 dans l'état actuel de notre inventaire. Après avoir commencé sa carrière en Belgique dans les années 1880 (il déménage le siège de son entreprise de Bruxelles à Paris en 1897), Hennebique a réussi à créer un véritable empire et à répandre son système de béton armé internationalement[13]. Comme la plupart des systèmes de béton armé qui se sont exportés avec succès, la réussite commerciale de Hennebique résulte d'une combinaison de facteurs : un système efficace sur le plan structural, une qualité d'exécution de béton coulé en place fiable et méticuleuse et un sens développé des affaires, en maîtrisant l'art de la promotion et de la publicité notamment. Le système bien connu de Hennebique comprend un ensemble monolithique formé par des dalles (hourdis), poutres et colonnes. Ce système a, en réalité, évolué avec le temps et cela se ressent aussi au travers des brevets.[14] (Fig. 5).

D'autres systèmes ont été importés massivement en Belgique comme les planchers Siegwart ou Herbst par exemple. Des cas belges d'exportations réussies existent également comme les claveaux pour la construction de tours par Monnoyer (Fig. 2) ou encore les pieux Franki moulés dans le sol, brevetés la première fois en 1909 par l'entrepreneur Edgard Frankignoul (1882-1954) (Fig. 6). De nombreux systèmes ont, par contre, été confinés à l'échelle locale ou nationale (système de l'entrepreneur Alphonse Vasanne par exemple). Certaines innovations n'ont par

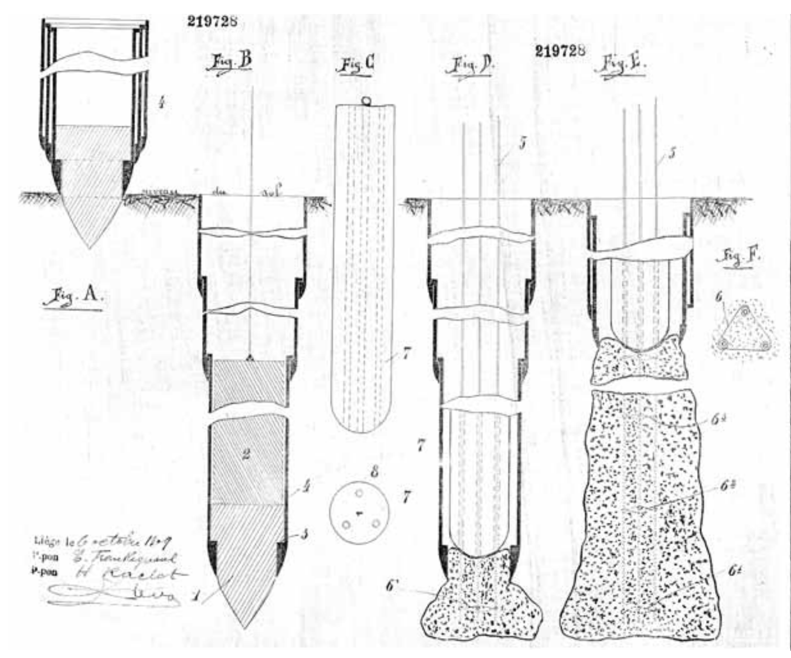





Figure 6 : À gauche, brevet d'octobre 1909 déposé par Frankignoul pour un pieu coulé en place avec fourreau provisoire[6] ; à droite exemple de mise en pratique au chantier des Fours à Coke de Vilvoorde en 1913[16]

contre pas été brevetées mais il semblerait que cela concerne une minorité de cas, même si Blaton en fut un exemple significatif. D'autres encore ont été utilisés abondamment dans les pays limitrophes mais n'ont pas eu de réel impact sur la construction belge pour de multiples et diverses raisons (comme, par exemple, les systèmes Monier, utilisés en Allemagne notamment ou Considère utilisés en Allemagne et en France). En conclusion, la grande diversité des brevets démontre un enthousiasme réel pour ce nouveau matériau mais leur impact économique dans le secteur de la construction est difficile à estimer[15].

## LA FIN DE L'HÉGÉMONIE DES BREVETS

En Belgique, la première norme sur le béton armé est publiée en 1923 par l'Association Belge de Standardisation. Cette publication est plutôt tardive par rapport aux autres pays européens (Allemagne 1904 ; France, 1906 ; Italie et Autriche, 1907 ; Danemark, 1908 ; Suisse, 1909 ; Royaume-Uni, 1911 ; Les Pays-Bas, 1912). Suite à l'Exposition universelle de Paris en 1900, la France avait constitué une commission d'études chargée d'édicter des règles de bonnes pratiques pour la conception d'un ouvrage en béton armé, de la composition du béton au dimensionnement de la structure. Cela a abouti en 1906 à la « Circulaire française relative au béton armé », qui sera souvent utilisée en Belgique comme document de référence jusqu'à la parution de « Instructions relatives aux ouvrages en béton armé » (A.B.S de 1923). Cette directive française est néanmoins libérale et évasive sur de nombreux aspects laissant ainsi une grande liberté aux concepteurs. L'idée sous-jacente à ce règlement, en effet, était d'encadrer l'utilisation croissante du béton armé tout en permettant d'encourager son développement théorique et expérimental par les constructeurs experts en la matière. Ces premiers règlements semblent tous privilégier la théorie élastique en contraintes admissibles pour le dimensionnent d'une pièce en béton armé. Cette théorie fut utilisée pendant des décennies pour être ensuite progressivement abandonnée au profit de modélisations plus réalistes et fiables. À l'aube de la Première Guerre mondiale, les mondes industriel et universitaire ont commencé à collaborer de plus en plus pour améliorer les performances structurales du matériau. Ce processus entrainera la fin du monopole des systèmes brevetés qui tomberont en désuétude par la standardisation du béton armé dès l'entre-deux-guerres.

## CONCLUSION

De cette recherche sur les brevets découlent plusieurs enseignements exposés ci-dessous.

- Avant la Première Guerre mondiale, le béton armé est gouverné par de nombreux systèmes, brevetés pour la plupart. Les brevets sont donc une source primordiale d'informations actuellement toujours accessible.

- Le dépouillement des brevets permet d'identifier l'expansion rapide du béton armé entre 1890 et 1914 et l'activité économique qui y est liée. Les types d'utilisation du béton armé, c'est-à-dire les différents éléments de structure employés et les technologies élaborées, sont également observables.

- Un brevet sur le béton armé ancien contient des renseignements techniques pouvant être utiles pour comprendre certaines constructions existantes, en particulier lors de projets de restauration.

- Les brevets comportent parfois des informations sur les inventeurs et leurs pays d'origine (distinction entre invention locale ou importée de l'étranger, indication de la profession de l'inventeur, etc.). Certains promoteurs actifs dans la diffusion du béton armé sont donc répertoriés dans la base de données de l'ensemble des brevets.

Cependant, l'étude des brevets est limitée par l'absence de contrôle de l'aspect novateur du brevet à l'époque, donc nombreux sont les brevets qui n'ont que peu d'intérêt scientifique. Par ailleurs, il est nécessaire de confronter les brevets avec d'autres sources d'informations pour estimer correctement leur impact réel et leurs applications pratiques. La prise d'un brevet, en effet, n'est pas gage de leur implémentation commerciale concrète.

## PRÉSENTATION DES ARCHIVES HENNEBIQUE

**Simon Vaillant**

Le fonds d'archives Hennebique est initialement conservé par le Conservatoire National des Arts et Métiers à Paris (CNAM) entre 1967 et 1989, date à laquelle il est déposé aux archives de l'Institut Français d'Architecture (Centre d'archives d'architecture du 20ème siècle de la Cité de l'architecture et du patrimoine à Paris). Bien qu'incomplet (estimé à 50 000 dossiers sur les 150 000 traités par l'agence entre 1898 et 1967), ce fonds demeure avec celui du bureau d'études Pelnard-Considère et Caquot (Archives du monde du travail de Roubaix) l'ensemble de documents le plus important qui existe sur l'histoire de la construction en béton armé. Très volumineux, il comprend 400 mètres linéaires de dossiers d'études, 10 mètres linéaires de pièces d'agences, 6 500 photographies (Fig. 1) et la quasi- intégralité de la revue « Le Béton Armé » (1898-1939)[1].

Les dossiers d'études constituent le corps principal du fonds et s'échelonnent de 1892 à 1939. D'importance inégale (en termes de volume et de contenu), chaque dossier reçoit un numéro de commande (numéro d'affaire) correspondant à celui de la série du bureau central. Les dossiers se composent de pièces écrites (correspondance, notes de calculs, feuilles de quantités, feuilles de « détail et

Figure 1 : François Hennebique et Giovanni-Antonio Porcheddu sur le chantier du pont du Risorgimento, Rome (octobre 1910)[6]





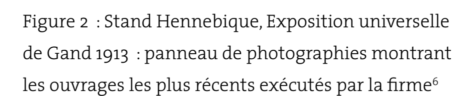
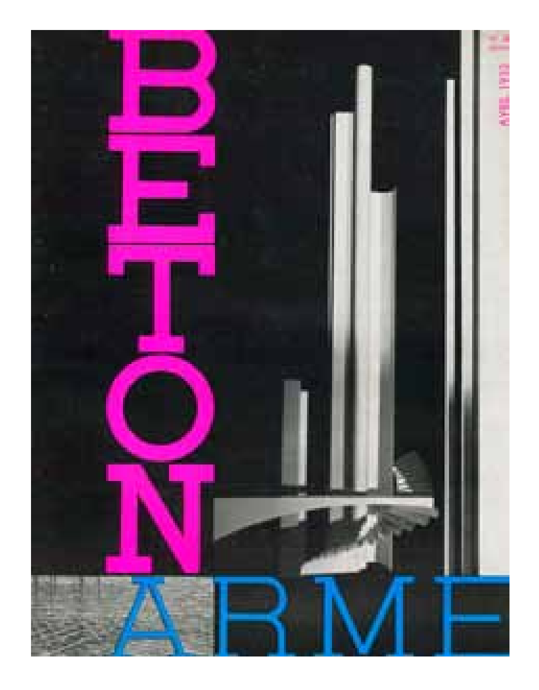


Figure 2 : Stand Hennebique, Exposition universelle de Gand 1913 : panneau de photographies montrant les ouvrages les plus récents exécutés par la firme[6]

Figure 3 : Couverture de la revue « Le Béton Armé », n° 302, avril 1933.




emploi des armatures ») permettant de dresser la commande des matériaux, mais aussi dans certains cas de documents imprimés (devis explicatifs, cahiers des charges, affiches d'adjudication, etc.), de documents graphiques techniques (tirages et calques de plans d'armatures, plans de structures, plans de ferraillages), de documents graphiques architecturaux (tirages et calques de plans d'architectes, d'ingénieurs ou d'entrepreneurs)[2].

Les photographies appartiennent au domaine de l'exécution, du chantier ; elles étaient envoyées par les agents et les concessionnaires pour être exposées dans les salons et congrès (Fig. 2) ou publiées dans la revue « Le Béton Armé » et dans les brochures commerciales. Archivées au siège de la firme (situé de 1902 à 1967 au 1 rue Danton à Paris), elles étaient nettoyées, voire retouchées afin de correspondre à l'image de marque d'Hennebique. Le bureau d'études réinvestit alors le chantier par la photographie et s'approprie l'ouvrage dont l'exécution lui échappe ; il se forge ainsi, du corpus très difficile à cerner que constitue la production bâtie, une véritable identité, ce qui semble faire défaut à ses concurrents[3].

La firme crée en 1898 une revue mensuelle qui s'avérera être un véritable organe officiel : « Le Béton Armé » (Fig. 3). Les numéros se composent de dossiers spécifiques à une typologie d'édifice (silos, réservoirs, usines, théâtres, grands magasins, etc.) ou d'exposés thématiques récurrents : résistance aux tremblements de terre, incombustibilité, étanchéité, etc. Des planches imprimées montrent les réalisations les plus significatives, détails techniques caractéristiques à l'appui, des images qui oscillent entre l'illustration technique et l'encart publicitaire. En cela, la revue fait partie intégrante du dispositif prescriptif détaillant, grâce aux planches et notices autographiques, l'ensemble des opérations nécessaires à la mise en œuvre du système Hennebique[4].

La majeure partie de ces archives est en bon état de conservation et ne présente que peu de signes d'altération. Au cours du classement actuellement mené, chaque document est référencé, coté et classé selon une approche topographique, différant du classement originel de l'agence Hennebique. Celui-ci consistait en un découpage typologique à deux niveaux de hiérarchie : six grandes séries (habitations, bâtiments publics, bâtiments industriels, ouvrages du génie civil, silos et réservoirs et essais) dont les subdivisions tota-

Figure 4 : Bureau central Hennebique, Paris (1912), Edouard Arnaud, arch. ; Roquerbe et Compagnie, entr. ; vue intérieure du service des archives[6]





Figure 5 : Bureau central Hennebique, Paris (1912), Edouard Arnaud, arch. ; Roquerbe et Compagnie, entr. ; vue intérieure des bureaux d'études[6]

lisaient 32 catégories d'ouvrages. À chacune de ces catégories correspondait un répertoire dans lequel les archivistes de la rue Danton enregistraient les photos (Fig. 4). Tous les éléments de ce catalogue nous sont parvenus, fournissant de nombreuses informations utiles au classement (indications géographiques, attributions des protagonistes, etc.)[2].

Le traitement des photographies a commencé en 1994 pour s'achever en 2000. 300 tirages ont été numérisés ; la numérisation intégrale du reste des photographies demeure en projet. Le traitement des dossiers d'études, commencé en 2005, se poursuivra jusqu'en 2016. À ce jour, plus de deux tiers des dossiers du fonds sont d'ores et déjà consultables grâce à la saisie instantanée de l'inventaire. Cet inventaire est consultable sur la base de données en ligne « Archiwebture » et l'ensemble des archives est communicable au Centre d'archives d'architecture du 20ème siècle (Paris). L'interrogation synchronique de ce corpus volumineux et complexe fait ressortir des récurrences toponymiques, chronologiques, patronymiques - et permet d'identifier la concomitance entre la diffusion progressive du matériau « béton » à travers un réseau d'ingénieurs dépositaires des brevets et l'évolution de sa mise en œuvre (Fig. 5)[5].

Alors que l'histoire de l'architecture crédite scrupuleusement le chantier - le confiant à l'histoire des techniques - les archives Hennebique révèlent justement l'architecture à travers sa matérialité constructive. Elles apportent un éclairage nouveau sur le travail et sur l'œuvre des architectes qui, très tôt confient leurs projets au constructeur qui a su gagner leur confiance. En expérimentant les potentialités structurale et architectonique du béton, ils assimilent cette nouvelle matière mais perdent le contrôle du projet constructif. Ce catalogue d'ouvrages, à mi-chemin entre l'ingénierie et l'architecture, constitue un grand réservoir d'informations désormais accessible pour les chercheurs.

## « LE BÉTON ARMÉ ». LA GENÈSE DE LA CONSTRUCTION EN BÉTON ARMÉ EN BELGIQUE AU TRAVERS DE LA REVUE DE FRANÇOIS HENNEBIQUE

**Stephanie Van de Voorde**

### FRANÇOIS HENNEBIQUE ET LA BELGIQUE

Bien qu'il soit séduisant de dire que le béton armé est une invention belge ou encore qu'Hennebique est l'inventeur de ce matériau, comme il l'a déclaré lui-même, il est plus correct de dire qu'il a inventé son système de béton armé pendant son long séjour en Belgique. Il était Français de naissance mais à l'âge de 25 ans, il franchit la frontière pour démarrer une entreprise de construction en Belgique, d'abord à Courtrai et ensuite à Bruxelles. Il resta en Belgique pendant 30 ans, et durant cette période il bâtit les fondations de son futur empire. En 1892, après une longue période d'essais et d'expérimentation, il déposa un brevet et l'exploita commercialement au travers de son bureau d'étude à Bruxelles.
Grâce à son ingénieux réseau formé d'agences locales et de concessionnaires, l'empire d'Hennebique s'étendit rapidement, avec des ramifications dans la plupart des pays d'Europe de l'Ouest dès le début du 20ème siècle. Même si le siège central fut transféré de Bruxelles à Paris en 1897, Hennebique resta très attaché à la Belgique : après la France et la Suisse, la Belgique est un des pays où son monopole n'a cessé de grandir. L'importance du réseau d'Hennebique peut être évaluée grâce à l'inventaire des archives du Fonds Hennebique à Paris. Bien qu'une partie seulement de cet




Figure 1 : Page de couverture de la revue « Le Béton Armé »[1]

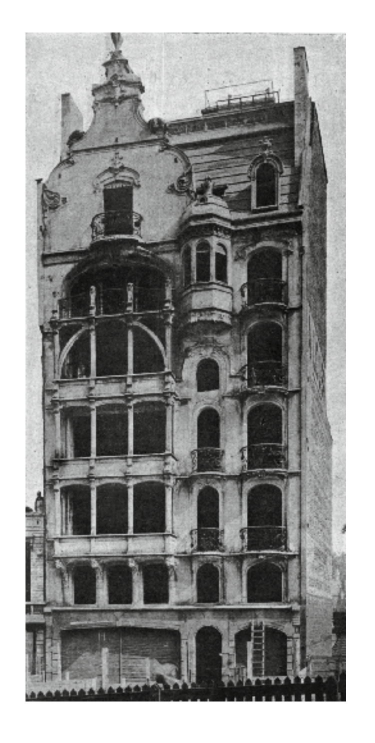
inventaire soit accessible sur Internet, le mot clé « Belgique » est mentionnée quelque mille fois. Le contenu des dossiers varie d'une simple photo à quelques boites. Une autre approche de recherche, plus pragmatique, est d'analyser la revue d'Hennebique, qui fut publiée de 1898 à 1939 (Fig. 1).

## À LA FRONTIÈRE ENTRE INFORMATION ET PROPAGANDE

La revue, avec ses 378 numéros au total, est un outil précieux pour comprendre l'héritage d'Hennebique. La revue était un moyen parmi d'autres dans la campagne publicitaire d'Hennebique de diffuser largement son système. Avec une moyenne de 3 000 à 10 000 tirages chaque mois, la revue permettait de contrôler une grande partie de la presse et d'imposer l'autorité d'Hennebique sur la construction en béton. Dans cette perspective, le titre de la revue est révélateur : en la baptisant « Le Béton Armé », elle embrasse en même temps le matériau en lui-même et le secteur entier de la construction en béton. Par son caractère international et sa longue durée de publication, la revue fut à l'avant-garde de la presse technique : la collection, outre le reflet de l'empire d'Hennebique, est aussi une référence essentielle pour documenter l'histoire générale du béton armé de la fin du 19ème siècle jusqu'à la Seconde Guerre mondiale. Une lecture attentive de la revue permet d'analyser son contenu et son importance au fil des années. Depuis 2011, la collection de la revue « Le Béton Armé » est, en effet, consultable sous format numérique grâce à un partenariat de l'Université de Gand et de l'Institut Français d'Architecture (http://lib.ugent.be/lebetonarme/). La revue offre un aperçu des applications de ce secteur en développement ainsi que de la structure et du fonctionnement de l'entreprise. À côté des articles factuels, la revue offre aussi des articles plus polémiques. Les thèmes récurrents sont la suprématie absolue du béton armé, surtout vis-à-vis de la sécurité incendie et de la résistance au feu, la recherche d'un nouveau style architectural pour le béton armé et le développement de normes officielles. Bien que les moyens et le discours de la revue aient changé petit à petit, la stratégie principale fut toujours de convaincre et de dominer. Le langage souvent militant et polémique place la revue à la frontière entre information et propagande. L'ensemble des résultats du réseau Hennebique fut largement diffusé alors que les concurrents étaient vivement critiqués. Bien entendu, la revue ne fait pas mention des revers et tensions à l'intérieur du réseau Hennebique. L'histoire réelle de la société présente donc un décalage avec son histoire présentée dans sa revue.

## « LE BÉTON ARMÉ » ET LA BELGIQUE

Le discours général de la revue a déjà été étudié par exemple par Delhumeau et Simonnet et, grâce à leur analyse critique, l'importance de la revue est largement saluée. Vu la relation particulière d'Hennebique avec la Belgique, la revue mérite une étude systématique en Belgique. La revue spécialisée la plus mentionnée en Belgique est « La Technique des Travaux », qui fut publiée par la « Compagnie Internationale des Pieux Franki ». Une autre revue un peu moins connue est la revue franco-belge « Revue du Béton Armé » : elle montre certaines ressemblances avec la revue d'Hennebique mais, étant publiée seulement après la Première Guerre mondiale, elle n'offre pas d'informations sur les premières applications du béton en Belgique. La revue d'Hennebique est donc une source de documentation unique. Une des principales raisons de l'absence de plus d'études sur la revue réside probablement dans la rareté de la collection. Ce n'est que depuis 2009, grâce à une donation importante du Fonds Hennebique de Paris que la collection de l'Université de Gand est maintenant complète aux trois-quarts.
La revue contient de nombreuses références à divers types de structures et bâtiments en Belgique. Bien entendu, la revue se concentre principalement sur la France, mais comparé à d'autres pays, il semble que la Belgique soit bien représentée et que la Belgique soit en fait un cas d'étude représentatif : les thèmes récurrents comme la qualité de résistance au feu et les nouvelles possibilités architecturales du béton sont amplement illustrés par des réalisations belges. Bien sûr, dès qu'une étape importante était franchie ou un anniversaire était célébré, les activités d'Hennebique au début de sa carrière en Belgique revenaient à l'esprit. De plus, les publications d'articles plus techniques écrits par des ingénieurs belges révélaient l'état de l'art en Belgique tant sur le plan des questions pratiques que sur celui des avancées théoriques scientifiques. Donc, on peut considérer que le climat général dépeint dans la revue correspond au contexte du secteur de la construction en béton armé en Belgique, d'un point de vue pratique comme théorique.




Treizième Année — Juillet 1910

LE BÉTON ARMÉ

Organe des Concessionnaires et Agents du Système HENNEBIQUE

SOMMAIRE

GRANDS MAGASINS TIETZ A BRUXELLES


Septième Année — Numéro 181 — Juin 1913

LE BÉTON ARMÉ

Organe des Agents et Concessionnaires du Système HENNEBIQUE

SOMMAIRE

Le Béton Armé Hennebique à l'Exposition de Gand



Figure 2 : Maison Dubois-Petit à Bruxelles[1], Magasins Tietz à Bruxelles[1], Hennebique à l'Exposition universelle à Gand[1]

## APPLICATIONS ET ARTICLES AVANT LA PREMIÈRE GUERRE MONDIALE

L'inventaire mensuel des travaux exécutés par la compagnie était indiqué dans la rubrique « travaux du mois », ce qui est une source valable d'informations sur l'étendue du réseau Hennebique en Belgique. Une analyse de cette rubrique montre qu'avant la Première Guerre mondiale il y avait 45 concessionnaires belges ; les plus productifs étaient Bolsée & Hargot, Hargot & Somers d'Anvers, Delvaux de Saint-Gilles, Louis de Waele de Bruxelles et Maurice Prax et sa Société des Fondations de Liège. La compilation de la liste des « travaux du mois » du bureau de Bruxelles totalise 1 200 travaux bien que la collection soit incomplète et que tous les travaux ne soient pas rigoureusement mentionnés dans ces listes. Des articles séparés donnent plus de détails sur quelques applications. Par exemple, la maison Dubois-Petit de l'architecte Saintenoy à Bruxelles est considérée comme une des premières maisons « tout en béton armé » de Belgique, mais elle a été démolie après quelques années car elle aurait entravé la vue du roi… (Fig. 2). Un autre exemple est le pont de Merksem à Anvers, un magasin à Bruxelles, des travaux de renforcement en sous-œuvre de l'église Notre-Dame de Laeken, les structures du Zoo d'Anvers, les magasins Tietz à Bruxelles (Fig. 2) et le stand d'Hennebique à l'Exposition universelle de Gand en 1913 (Fig. 2).

Une réalisation en particulier mérite plus d'attention : la passerelle Mativa de Liège, construite pour l'Exposition universelle de 1905. Parce que ce pont est extrêmement élancé, il est décrit comme le « pont idéal par excellence ». Il a été soumis à de sévères tests, avec application de charges variables de 450 cavaliers et un régiment d'infanterie, réalisés en présence d'Hennebique lui-même (Fig. 3). Comme le pont a passé avec succès ces tests, la revue a souvent cité ce pont en exemple pour soutenir la thèse du béton armé comme le matériau idéal pour construire les ponts.

Figure 3 : Passerelle Mativa à Liège[1]



Un autre évènement spectaculaire et comparable, souvent mentionné, fut le test au feu effectué par Hennebique sur un pavillon à l'Exposition provinciale à Gand de 1899 : après trois heures d'incendie intensif avec des températures jusqu'à 1 000 degrés, la capacité portante du pavillon resta intacte. Outre ces applications pratiques et ces tests, montrer des photos des structures métalliques endommagées par le feu était une pratique courante, par exemple avec l'effondrement de ponts ou encore la catastrophe de l'Exposition universelle de Bruxelles de 1910. Un cas particulièrement frappant illustre bien la supériorité du système Hennebique : en 1901, en quelques jours seulement, un incendie a détruit deux usines à Bruxelles : l'une était complètement anéantie alors que l'autre, une filature construite selon le système Hennebique, était restée intacte. Cette occasion fortuite fut un exemple parfait pour démontrer le fameux slogan d'Hennebique « Plus d'incendies désastreux ».

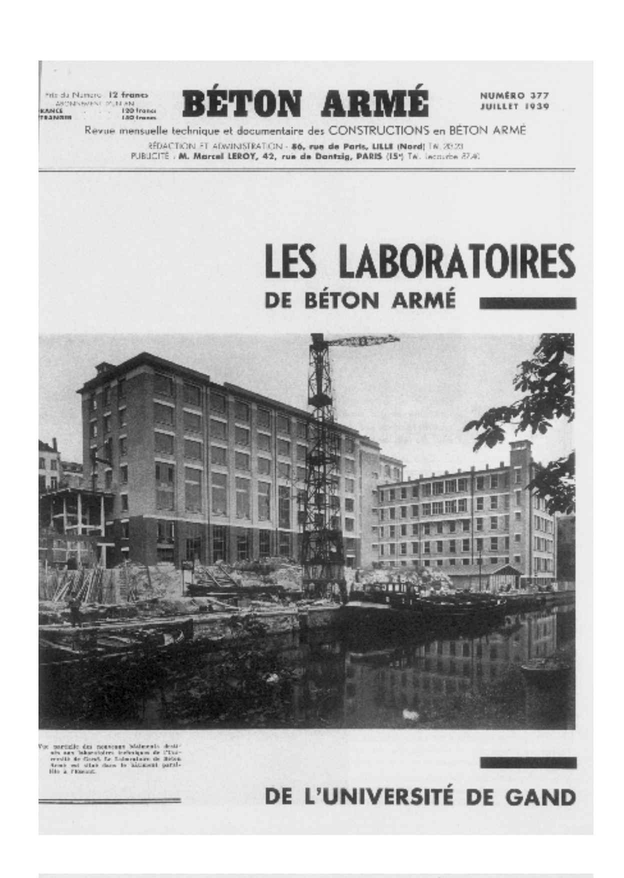
Figure 4 : Immeuble d'habitation à Gand par Louis Cloquet[1]



Pour valider l'autorité d'Hennebique, la revue cite aussi des spécialistes comme Charles Rabut et Armand Considère, mais aussi des spécialistes belges comme Paul Christophe, un ingénieur belge du ministère des travaux publics qui eut aussi sa tribune. En 1899, Christophe écrivit une série d'articles intitulé « Le béton armé et ses applications » pour « Les Annales des Travaux Publics de Belgique ». Un peu plus tôt cette année-là, Christophe assista à un congrès annuel d'Hennebique. Ceci permet de comprendre pourquoi le système Hennebique occupe une place prépondérante dans les écrits de Christophe. Hennebique fut très satisfait de reproduire ces articles dans sa propre revue. En 1902, Christophe publia une édition revue et élargie de ses articles dans un livre, qui est reconnu internationalement comme un des tous premiers recueils sur le béton armé.
Un autre ingénieur et architecte belge cité dans la revue est Louis Cloquet, professeur à l'Université de Gand et qui travailla à plusieurs reprises avec Hennebique. Il ajouta une contribution intéressante au débat entre béton armé et architecture, l'illustrant avec un exemple d'immeuble qu'il avait construit à Gand (Fig. 4). Cependant, il conclut avec une remarque critique sur l'utilisation du béton armé en façade, laquelle manquait encore souvent d'expression car, toujours selon Cloquet, le style architectural approprié pour le béton armé n'avait pas encore été trouvé. Le comité de rédaction de la revue s'empressa d'ajouter une note dans laquelle il nuança le propos de Louis Cloquet.

## LE « BÉTON ARMÉ » PENDANT L'ENTRE-DEUX-GUERRES

Après la guerre, la structure et le contenu de la revue furent transformés : puisque le béton armé était petit à petit accepté, la revue perdit sa « raison d'être ». Le nombre croissant d'entrepreneurs et d'ingénieurs spécialisés en béton armé fit perdre à l'entreprise Hennebique sa spécificité et le nom d'Hennebique perdit de son pouvoir commercial. En témoigne le changement dans le sous-titre, qui avant la guerre soulignait la cohérence du réseau d'Hennebique, mais qui après la guerre, devint plus général avec « Revue technique et documentaire en béton armé système Hennebique ». En 1932, la référence à Hennebique disparait complètement du sous-titre, encore que le Post-it improvisé sur la page de couverture des derniers numéros,


Prix du Numéro : 12 francs
ABONNEMENT D'UN AN
RANCE . . . . 120 francs
TRANGER . . . . 180 francs

# BÉTON ARMÉ

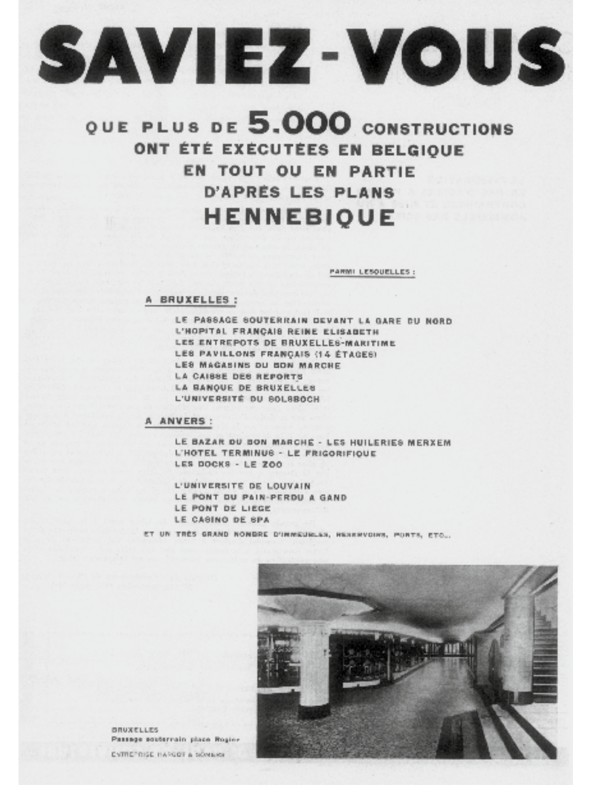
NUMÉRO 377
JUILLET 1939

Revue mensuelle technique et documentaire des CONSTRUCTIONS en BÉTON ARMÉ

RÉDACTION ET ADMINISTRATION - 86, rue de Paris, LILLE (Nord)
PUBLICITÉ : M. Marcel LEROY, 42, rue de Dantzig, PARIS (15e)

## LES LABORATOIRES
### DE BÉTON ARMÉ

### DE L'UNIVERSITÉ DE GAND


## SAVIEZ-VOUS

QUE PLUS DE 5.000 CONSTRUCTIONS
ONT ÉTÉ EXÉCUTÉES EN BELGIQUE
EN TOUT OU EN PARTIE
D'APRÈS LES PLANS
HENNEBIQUE

PARMI LESQUELLES :

A BRUXELLES :

LE PASSAGE SOUTERRAIN DEVANT LA GARE DU NORD
L'HOPITAL FRANÇAIS REINE ELISABETH
LES ENTREPOTS DE BRUXELLES-MARITIME
LES PAVILLONS FRANÇAIS (14 ÉTAGES)
LES MAGASINS DU BON MARCHE
LA CAISSE DES REPORTS
LA BANQUE DE BRUXELLES
L'UNIVERSITÉ DU SOLBOCH

A ANVERS :

LE BAZAR DU BON MARCHÉ - LES HUILERIES MERXEM
L'HOTEL TERMINUS - LE FRIGORIFIQUE
LES DOCKS - LE ZOO

L'UNIVERSITÉ DE LOUVAIN
LE PONT DU PAIN-PERDU A GAND
LE PONT DE LIEGE
LE CASINO DE SPA

ET UN TRÈS GRAND NOMBRE D'IMMEUBLES, RÉSERVOIRS, PONTS, ETC..

BRUXELLES
Passage souterrain place Rogier

montre une tentative de restaurer le lien avec son fondateur.

À côté du contraste frappant de forme et d'impact, la revue perdit aussi de sa valeur informative : presque trois-quarts de la revue concerne des publicités et énumération des concessionnaires. Souvent, la revue contient seulement un ou deux articles de fond, qui pour la plupart consistent en photos. De plus, très peu d'articles sont originaux, la plupart étant des reproductions provenant d'autres revues, par exemple « L'Émulation », la revue de la Société Centrale d'Architecture de Belgique, qui publia des articles sur l'église de Bléharies d'Henri Lacoste et des nouveaux bâtiments de l'Université de Bruxelles. « Le Béton Armé » reproduisit également des articles de « La Technique des Travaux », qui ironiquement fit de la publicité dans « Le Béton Armé », indiquant qu'il s'agit d'une revue qu'il faut lire pour se tenir au courant ! Les deux derniers numéros de la revue sont consacrés exclusivement à la Belgique. En juillet 1939, la revue donne des détails sur le laboratoire de béton armé à Gand, créé par Gustave Magnel (Fig. 5). Aussi la rubrique « Saviez-vous ? » se concentre sur la Belgique (Fig. 5). Le dernier numéro offre une rétrospective des 50 ans du béton armé en Belgique, avec seize pages de reportage photo sur les structures les plus importantes et les plus remarquables construites en Belgique. Dans le cadre des recherches sur le béton armé en Belgique, ce numéro signe donc de façon symbolique la mort de la revue.

Figure 5 : Les laboratoires du béton armé à Gand[1], plus de 5 000 constructions d'Hennebique en Belgique[1]

## RÉFÉRENCES

**B. Espion - Du béton des Romains aux débuts du béton armé**

[1] Crédit photographique : Port Musée de Douarnenez
[2] Rondelet, J. (1802-1867). *Traité théorique et pratique de l'art de bâtir*. Paris.
[3] Newby, F. (editor) (2001) *Early reinforced concrete, Studies in the history of civil engineering*, vol.11. Aldershot, U.K. : Ashgate.
[4] *Cent Ans de Béton Armé (1849-1949)*. (1949). Paris : Éditions Science & Industrie.
[5] Christophe, P. (1899). Le béton armé et ses applications. *Annales des Travaux Publics de Belgique*, 4 (3, 4, 6), 429-538 ; 647-678 ; 961-1118.
[6] Bosc, J.-L. et al. (2001) *Joseph Monier et la naissance du ciment armé. Paris* : Éditions du Linteau
[7] Collins, P. (1995) *Splendeur du béton : les prédécesseurs et l'œuvre d'Auguste Perret*. Paris : Hazan
[8] Delhumeau, G. (1999) *L'invention du béton armé : Hennebique 1890-1914*. Paris : Norma Éditions
[9] Delhumeau, G. et al. (1993) *Le béton en représentation : la mémoire photographique de l'entreprise Hennebique 1890-1930*. Paris : Hazan
[10] Haegermann, G. et al. (1964) *Vom Caementum zum Spannbeton - Beitrage zur Geschichte des Betons.* Wiesbaden-Berlin : Bauverlag GmbH.
[11] Guillerme, A. (1995) *Bâtir la ville : révolutions industrielles dans les matériaux de construction France-Grande-Bretagne* (1760-1840), Champ Vallon
[12] Newlon, H. (editor) (1976) *A selection of American papers on concrete* - 1876-1926, ACI-SP-52. Detroit : American Concrete Institute
[13] Schmidt, H. (1999) *Zur Geschichte des Stahlbetonbaues - Die Anfänge in Deutschland 1850 bis 1910, Beton- und Stahlbeton Spezial*. Berlin : Ernst & Sohn.
[14] Simonnet, C. (2005) *Le béton. Histoire d'un matériau*. Marseille : Éditions Parenthèses.
[15] Sutherland, J. et al. (2001) *Historic concrete: background to appraisal*. London: Thomas Telford.

**A. Hellebois - Première génération de béton armé : le règne des brevets, entre systèmes commerciaux et normes naissantes.**

[1] Hellebois, A. & Espion, B. (2010). Domination of commercial patents in the evolution of early reinforced concrete. Case-study of the region of Brussels. *Proceedings of the 7th Conference on Structural Analysis of Historic Constructions : Strengthening and Retrofitting*, (Gu, X. & Song, X. Ed), 119-124.
[2] Caron F. (1984). Introduction : Pour une économie de l'innovation. *Les brevets : leur utilisation en Histoire des techniques et de l'économie*, Paris, 1984, 7-18.
[3] Peters, A. (2006). Le système belge des brevets au 19ème siècle. *GEHEC Newsletter*, 4, 1-15.
[4] Inkster, I. (2005). Intellectual Property, Information, and Divergences in Economic Development - Historical Patterns and Statistics *circa* 1421-2000. *The Role of Intellectual Property Rights in Biotechnology Innovation*, 1-24.
[5] Colby, A. (1909). *Reinforced Concrete in Europe*. The chemical Publishing co., South Bethlehem, 1-147.
[6] Office Belge de la Propriété Intellectuelle (OPRI), archives of the Ministry of Economy, Brussels.
[7] Baes, L. (1932). *Le béton armé, quelques notes sur les débuts, quelques notes actuelles*. F. Van Buggenhoudt, Bruxelles.
[8] Kurrer, KE. (2008). *The History of the Theory of Structures, from arch analysis to computational mechanics*. Ernst & Sohn, Berlin, 496-570.
[9] Hatt, W. K. (1916). Genesis of reinforced concrete construction. *ACI, Proceedings of the 12th Annual Convention*, 12(2), 21-39.
[10] Galvez-Behar, G. (2008). *La république des inventeurs : propriété et organisation de l'innovation en France, 1791-1922*. Presses Universitaires de Rennes, 9-348.
[11] Gubler, J. (1985). Prolégomènes à Hennebique. *Études de lettres, Université de Lausanne*, 207(4), 63-87.
[12] Christophe, P. (1899). Le béton armé et ses applications. *Annales des Travaux Publics de Belgique*, 4(3, 4, 6), 429-538 ; 647-678 ; 961-1118.
[13] Delhumeau, G. (1999). *L'invention du béton armé, Hennebique 1890-1914*. Norma, Paris, 11-300.
[14] Hellebois, A. & Espion, B. (2012) Insight into technological aspects of the evolution of the Hennebique reinforced concrete system. *Proceedings of the 8th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions, Wroclaw* (Jasienko J. Ed.) DWE, Wroclaw, Poland, 1160-1170.
[15] Griliches, K. (1990). Patent statistics as Economic indicators: a survey. *Journal of Economic Literature*, 28, 1661-1707.
[16] An. (1922). *Système spécial de fondations en béton en tous genres de terrains. Compagnie Internationale des Pieux Armés Frankignoul*. Liège.
[17] Bussell, M. (2001). The era of the proprietary systems. *Historic concrete background to appraisal*, Thomas Telford, London, 67-82.

**S. Vaillant - Présentation des archives Hennebique**

[1] Piaton, C., Godoli, E., Peyceré, D. (dir.) (2012). *Construire au-delà de la Méditerranée : l'apport des archives d'entreprises européennes (1860-1970).* Arles : Honoré Clair.
[2] Gaubert, S., Foulonneau, E., Frapier, C., Joulie-Mares, I., Vaillant, S. (2007). *Les Archives du bureau d'études de béton armé Hennebique* : aperçu d'un fonds, 1892-1931. *Colonnes*, n° 24, 35-42.
[3] Delhumeau, G., Gubler, J., Simonnet, C., Legault, R. (1993). *Le béton en représentation : la mémoire photographique de l'entreprise Hennebique 1890-1930*. Paris : Ifa/Hazan.
[4] Van de Voorde, S. (2009). Hennebique's journal Le Béton Armé. A close reading of the genesis of concrete construction in Belgium, in : Karl-Eugen Kurrer, Werner Lorenz, Volker Wetzk (eds.), *Proceedings of the Third International Congress on Construction History*. 3. Cottbus : Brandenburg University of Technology, 1453-1461.
[5] Delhumeau, G. (1999). *L'invention du béton armé : Hennebique, 1890-1914*. Paris : Ifa/Norma.

[6] Fonds Hennebique. CNAM/SIAF/CAPA/Archives d'architecture du 20ème siècle/2012. Figure 1 : 76 Ifa 43/12, Figure 2 : 76 Ifa 43/12, Figure 3 : 076 IFA 100/1, Figure 5 : 076 IFA 1/1

**S. Van de Voorde - « Le Béton Armé ». La genèse de la construction en béton armé en Belgique au travers de la revue de François Hennebique**

[1] (1898-1939), *Le Béton Armé*, 1-378. Figure 1 : (1899, *Le Béton Armé*, 11), Figure 2 : (1908, *Le Béton Armé*, 117, 20), (1910, *Le Béton Armé*, 146, 97), (1913, *Le Béton Armé*, 181, 81), Figure 3 : Fonds Hennebique. CNAM/SIAF/CAPA/Archives d'architecture du XXe siècle (BAH-4-1904-09868), Figure 4 : (1908, *Le Béton Armé*, 117, 24), Figure 5 : (1939, *Le Béton Armé*, 377, 2023), (1938, *Le Béton Armé*, 365, 1846)
[2] (1992). *Les cahiers de la recherche architecturale*, 29 (numéro spécial : *Culture Constructive*).
[3] Baes, L. (1932). *Le béton armé. Quelques notes sur les débuts, quelques notes actuelles*. Bruxelles : F. Van Buggenhoudt.
[4] Christophe, P. (1899). Le béton armé et ses applications. *Les Annales des Travaux Publics de Belgique*. 56(3, 4, 6), 429-538, 647-678, 961-1124.
[5] Christophe, P. (1902). *Le béton armé et ses applications*. Liège/Paris : Béranger.
[6] Delhumeau, G. (1999). *L'invention du béton armé : Hennebique, 1890-1914*. Paris : Norma.
[7] Delhumeau, G. et al. (1993). *Le béton en représentation. Le mémoire photographique de l'entreprise Hennebique 1890-1930*. Paris : Hazan/Institut Français d'Architecture.
[8] Simonnet, C. (2005). *Le béton. Histoire d'un matériau*. Économie, technique, architecture. Marseille : Parenthèses.
[9] Van de Voorde, S. & Devos, R. (2012). The "Scientification" of Reinforced Concrete in Belgium during the Interwar Period : Development and Dissemination of Scientific, Theoretical and Technical Knowledge, *4th International Congress on Construction History*. Paris : Picard, t.2, 637-645.
[10] Van de Voorde, S. (2009). Hennebique's journal 'Le Béton Armé' : a close reading of the genesis of concrete construction in Belgium. *Proceedings of the Third International Congress on Construction History*. Cottbus : Brandenburg University of Technology, t.3, 1453-1461.
[11] Van de Voorde, S. (2011). *Bouwen in Beton in België (1890-1975)*. Samenspel van kennis, experiment en innovatie. Université de Gand (thèse de doctorat), 2 v.
[12] Van de Voorde, S. (2011). Hennebique François, pionier van het gewapend beton, *Nationaal Biografisch Woordenboek*. Bruxelles : Paleis der Academiën, t.20, pp. 458-471.
[13] Van Durme, V. (1978). *Betonarchitectuur in België vóór 1940*. Université de Gand (mémoire de fin d'études)

# 2. BÉTON ARMÉ ET ARCHITECTURE DANS LA PREMIÈRE MOITIÉ DU 20ÈME SIÈCLE. DE MATÉRIAU DE CONSTRUCTION À MATÉRIAU D'ARCHITECTURE

D'abord proposé par les entrepreneurs pour son faible coût et sa résistance au feu, le béton armé va progressivement être investi par les architectes pour devenir un matériau de construction à part entière. Ce chapitre illustre cette évolution au cours de la première moitié du 20ème siècle. À Héliopolis et au Stade des jeux de Namur, il est matériau de structure et matériau de parement grâce aux formes multiples qui peuvent lui être données. Au Varia de Jumet et au Forum à Liège, il est utilisé pour sa résistance au feu. À Bléharies et au Mémorial de Cointe, il s'affirme à l'intérieur mais est absent en façade. Finalement, à la *Boekentoren* de l'Université de Gand, l'architecte Henry van de Velde l'utilise en structure et en parement, comme matériau de structure et aussi matériau d'architecture. Le chapitre 7 nous montrera qu'au travers du béton architectonique d'abord et de la construction en béton apparent ensuite, le béton armé a aujourd'hui définitivement acquis ses lettres de noblesse.

## PREMIERS BÉTONS ET ÉCRITURE ARCHITECTURALE : LA VILLE NOUVELLE D'HÉLIOPOLIS. 1905-1922

**Anne Van Loo**

Les premiers bétons ont généralement été mis en œuvre dans des ouvrages utilitaires, pour imiter des matériaux plus nobles, ou dans un objectif démonstratif. Mais, dès le début du 20ème siècle, des réalisations plus ambitieuses voient le jour. L'une des plus spectaculaires est la ville d'Héliopolis, fondée en 1905 près du Caire par le banquier et industriel belge Edouard Empain (1852-1929). Avec l'Exposition universelle de Paris en 1900, il s'agit de la plus importante réalisation en béton armé de l'époque. La première phase de construction de cette ville nouvelle (1905-1922) porte indubitablement l'empreinte de ce matériau et, plus précisément, du système Hennebique (Fig. 1).

Au départ, le projet consiste à édifier une ville moderne sous forme d'oasis dans un morceau de désert acquis par la Cairo Electric Railways & Heliopolis Oasis Company. L'ensemble est relié à la capitale égyptienne par tramway et chemin de fer électrique. Empain inscrit son projet dans l'histoire en baptisant sa ville du nom d'une cité antique que l'on situait à cet emplacement mais aussi en déclarant « rénover la tradition de l'art musulman ». Un montage financier habile et la maîtrise économique totale du bâti lui permettent d'affronter le gigantisme de l'entreprise et de traverser la crise qui accable le Caire à partir de 1907.

Les trois fondements du projet sont :

- Un plan de ville structuré

Bien qu'on ne lui connaisse pas d'urbaniste en titre, Héliopolis s'inscrit dans la foulée du Town Planning et du Park System. Le premier plan (1907) met en place des formes urbaines structurées (comme le boulevard circulaire), bien connectées entre elles et avec la capitale. Si les affectations et les typologies sont réparties par zone, une véritable mixité caractérise les deux centres reliés par une majestueuse avenue arborée. Au centre

Figure 1 : Le plan d'Héliopolis en 1913[1]

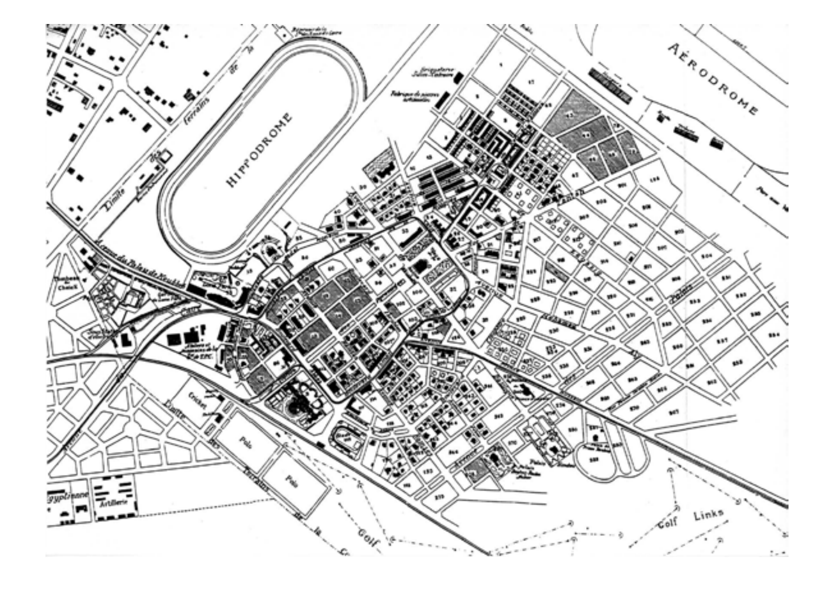




Figure 2 : Le siège de la Compagnie d'Héliopolis en construction vers 1908, architecte E. Jaspar[2]

géométrique de l'ensemble, la basilique est implantée sur l'axe transversal principal. À partir de cette structure, Héliopolis s'organise sur un schéma plutôt en étoile qu'en damier. Une hiérarchie fine des voiries soutient le maillage vert et organise la densité.

- Des typologies d'immeubles multiples

Différents types de villas et d'habitations à toitures débordantes sont déclinés en fonction de l'importance des voiries. Mais la typologie la plus originale est l'immeuble à arcades sur rez-de-chaussée commercial (Fig. 2). Son prototype est étudié pour le siège de la Compagnie immobilière d'Héliopolis par l'architecte bruxellois Ernest Jaspar (1876-1940), également auteur du plus vaste édifice de la ville, l'Héliopolis Palace Hotel. Les immeubles mitoyens donnent un caractère urbain au boulevard circulaire qui délimite le centre d'affaires.

- Un cahier des charges performant

Cet outil d'une grande précision est la pierre angulaire sur laquelle repose l'identité de la ville. Sur fond de crise, il permet de faire l'économie d'un bataillon d'architectes en s'adjoignant un service technique efficace. Il oblige notamment le recours à certains matériaux, comme les briques silico-calcaires et le béton armé. Le système Hennebique va accentuer la cohérence architecturale des bâtiments en dictant le rythme très caractéristique des dalles-poutres qui s'affiche clairement en façade. Il est utilisé à l'échelle de la ville entière, dans les logements populaires comme dans les bâtiments emblématiques. En permettant la réalisation aisée de porte-à-faux, il favorise le recours à une série de dispositifs de protection contre le soleil : terrasses couvertes, loggias, balcons, auvents, pergolas, corniches débordantes, etc., qui donnent un air de famille aux constructions les plus diverses. Les éléments caractéristiques du vocabulaire architectural et décoratif sont fabriqués sur place, à grande échelle, dans les usines créées spécialement à cet effet dès 1906.

Comme dans les cités anciennes résultant d'une longue évolution, la scénographie d'Héliopolis est rehaussée de bâtiments remarquables, généralement liés à la vie sociale. C'est à Alexandre Marcel (1860-1928), architecte orientaliste français renommé, rencontré à l'Exposition de Paris 1900, que Empain commande plusieurs d'entre eux, comme la basilique byzantine où il se fera inhumer en 1930 et son habitation personnelle, la Villa hindoue, connue aujourd'hui sous le nom de Palais Empain (Fig. 3)[3].

Le Palais Empain est une construction mixte (maçonnerie de briques silico-calcaires et béton armé système Hennebique), conformément au cahier des charges de la compagnie immobilière. Il s'agit d'un bâtiment démonstratif, dont la tour culmine à 30 m. Plusieurs motifs décoratifs sont empruntés au pavillon des Messageries maritimes que Marcel avait édifié à l'Exposition de Paris 1900. Savamment mis en scène à l'intersection de deux axes urbains, il signale la demeure du fondateur de la ville et témoigne des possibilités constructives quasi infinies du système Hennebique. On travaille à la limite du raisonnable ; en raison de la sophistication des ouvrages, les calculs et plans de béton sont réalisés par le bureau central de Paris. Des centaines de moulages fabriqués en série, en béton armé ou non, sont rapportés sur les parois ou servent de coffrages perdus aux portiques, aux balustrades et aux corniches. Le tout est enduit et recouvert d'un badigeon fortement hydraulique, de couleur terre de Sienne brûlée, donnant l'illusion d'un édifice en pierre sculptée s'inspirant de temples du 10ème siècle du nord de l'Inde.

Les photographies de chantier et la correspondance conservées à Paris par l'Institut Français d'Architecture (fonds des Bétons Armés Hennebique) donnent une idée de la complexité des travaux. Les analyses des bétons effectuées en 2009 par l'architecte Guido Stegen à la demande du Ministère des Affaires étrangères de Belgique montrent que le béton structural coulé sur place est très



Figure 3 : Le Palais Empain en 2007, architecte A. Marcel[3]

carbonaté (parfois sur une profondeur de 6 à 8 cm), tandis que les pièces préfabriquées le sont beaucoup moins (1 à 1,5 cm) en raison de leur meilleure compacité. Toutefois, la carbonatation n'est pas le facteur déterminant de la dégradation des bétons : ce sont les infiltrations d'eau dues à l'abandon de l'édifice pendant près de 50 ans qui ont aggravé la corrosion des armatures. Celles-ci sont en acier doux et les étriers plats en acier galvanisé. Enfin, la structure en béton armé est souvent surdimensionnée. Si la stabilité de l'édifice n'est pas menacée, il est toutefois temps de procéder à sa restauration.

À Héliopolis, la mise en place d'outils performants de gestion et de contrôle a permis le passage de l'échelle architecturale à l'échelle urbaine, malgré le contexte économique difficile qui précède l'indépendance de l'Égypte en 1922. Mais l'efficacité des systèmes constructifs adoptés a largement contribué à la maîtrise totale des formes urbaines. Parmi ceux-ci, le béton armé système Hennebique et ses contraintes ont marqué de manière indélébile la forte identité de la ville que, faute d'investisseurs, Empain finira par construire presque entièrement lui-même entre 1906 et 1922. À partir de 1925, Héliopolis connaîtra un développement extraordinaire, favorisant une diversification des intervenants, toujours dans le respect du cahier des charges. Sa structure urbaine et son style qui revisite l'architecture islamique, à mi-chemin entre l'Art nouveau et l'Art Déco, font toujours de ce morceau de ville - rattrapé par la capitale dans les années 1960 - un des quartiers les plus dynamiques et les plus recherchés du Grand Caire (Fig. 4).



Figure 4 : Le boulevard Ibrahim al-Laqqâny en 1997[4]

## L'ENSEMBLE DU STADE DES JEUX ET DU THÉÂTRE EN PLEIN AIR DE NAMUR : GEORGES HOBÉ, MAURICE PRAX ET LE SYSTÈME HENNEBIQUE. 1906-1910

**Raymond Balau**

Il existe à Namur un ensemble architectural aussi exceptionnel que négligé, toujours en attente de classement comme monument, son devenir étant donc incertain. Comment le décrire ? Il s'agit non seulement d'architecture et de construction, mais aussi de paysage et d'infrastructures de déplacement, dans le contexte hautement patrimonial de la Citadelle. L'histoire du domaine fortifié de Namur a deux faces, l'une militaire et antédiluvienne, avec des héros tels que Don Juan d'Autriche et Vauban (dont la gloire posthume a prévalu sur celle du réel « fortificateur », Menno Van Coehoorn), l'autre civile et méconnue, sans héros puisque pratiquement laissée à l'abandon depuis des décennies. Génie militaire d'un côté, génie civil de l'autre. C'est du second qu'il est ici question, et des problèmes qu'il pose aujourd'hui.

### CONTEXTE HISTORIQUE ET ENJEUX URBAINS

L'ensemble formé par le Stade des jeux et le Théâtre en plein air, œuvre de l'architecte décorateur Georges Hobé (1854-1936) est en effet unique en Europe, par ses enjeux urbains et ses particularités architecturales, comme par les caractéristiques du site (Fig. 1).

Pour en évaluer l'importance, il faut se référer à la dernière décennie du 19ème siècle. Démantelées quelques décennies auparavant, les fortifications urbaines ont été remplacées à Anvers, Liège et Namur par un réseau de forts extérieurs souterrains, adaptés aux « progrès » de l'artillerie de siège et à la nécessité de préserver les populations des villes, le tout à l'instigation de l'inspecteur général du Génie et des Fortifications Henri-Alexis Brialmont. En 1891, Namur a été déclarée « ville ouverte », seul un réduit de commandement subsistant dans la Citadelle, les autres ouvrages et surtout le glacis défensif étant affectés à des activités civiles. C'est alors, sous l'impulsion de Léopold II, qu'un plan de parc a été dressé par l'architecte paysagiste Elie Laîné, sur les 70 hectares bordant les ouvrages fortifiés maintenus, de la Meuse à la Sambre, et englobant le site des ouvrages détachés (trois lunettes et la tour carrée). Le plan de Laîné, qui prévoyait des installations de loisirs et d'hôtellerie, ainsi qu'un lotissement de villas de luxe, était insuffisant. L'initiative privée a donc été encouragée. L'industriel namurois Michel Thonar a constitué une société, pour mettre sur pieds un grand hôtel, un institut hydrothérapique et diverses installations, comme un funiculaire ou un vélodrome, en poursuivant bien entendu l'aménagement des chemins et plantations. Mais l'affaire a fait long feu. Une autre société, avec Paul Otlet parmi les actionnaires, a pris le relais et mené à bien les premiers investissements, avec l'arrière-pensée de remettre un jour l'ensemble à la Ville. Le réseau ferroviaire international se développant, Namur n'étant ni Gstaad ni Locarno, le seuil de rentabilité n'a pas été atteint ; la Première Guerre mondiale a ensuite brisé l'élan.

Cela dit, par l'intermédiaire du comte Paul de Smet de Naeyer, Ministre des Finances et des Travaux publics, grand metteur en œuvre de la politique léopoldienne de modernisation et d'équipement du pays, une expérience inédite a été tentée à Namur, sous la conduite de l'architecte décorateur Georges Hobé (Fig. 2), qui après avoir été l'un des pionniers de l'Art nouveau, s'était taillé une réputation de bâtisseur dans le domaine de l'architecture domestique. Entreprenant et apprécié, proche du pouvoir, il avait accédé à la commande publique vers 1905, et Namur allait constituer sa plus importante contribution en la matière. Il s'agissait en effet de concrétiser un programme urbain basé sur la réappropriation des boulevards, pour inscrire la Citadelle dans un réseau de desserte efficace, tout en construisant un nouveau




Figure 1 : Carte postale, vue côté Théâtre en plein air[8]

*Kursaal* en bord de Meuse et un complexe de divertissement en plein air, sur les hauteurs, entre Terra Nova et les bois de la Marlagne, le site dans son ensemble présentant un attrait exceptionnel. Georges Hobé a donné les directives principales pour ces travaux, et dessiné les deux bâtiments monumentaux, le nouveau *Kursaal*, au pied de la Route merveilleuse, et le complexe bicéphale formé par le Stade des jeux et le Théâtre en plein air, à son arrivée. Si ces éléments du programme ont été réalisés, un pont en béton armé enjambant la Sambre et un parc s'étageant côté Meuse ne l'ont pas été.

Ces indications permettent d'évaluer les caractéristiques du Stade et du Théâtre, parties intégrantes d'un complexe assurant une série de liaisons visuelles et fonctionnelles entre plusieurs entités architecturales isolées jusque-là, à savoir la forteresse de Terra Nova, le Grand Hôtel et le Palais forestier, les deux derniers respectivement inaugurés en 1899 et en 1901. Un funiculaire — le premier de Belgique — reliait par ailleurs le tramway Namur-Wépion à l'hôtel. D'autres projets ont été imaginés, comme un hippodrome, mais sans lendemain. Un premier projet de *Kursaal* dessiné par Hobé, jugé trop onéreux, a conduit à une version plus modeste, celle dont une partie subsiste aujourd'hui. C'est donc dans un contexte de transformation radicale de la périphérie immédiate du centre ville que Georges Hobé a conçu un complexe de loisirs unique par sa configuration, par ses caractéristiques constructives et par son langage décoratif.

## PROGRAMME ET IMPLANTATION

Avant l'intervention de l'architecte, une esplanade et des terrasses en escalier grossièrement taillées dans la roche existaient déjà, pour le public de diverses fêtes, militaires, sportives, folkloriques… Une partie des fenêtres du Grand Hôtel donnaient sur ce site où quelque chose manquait. Bien que contestée, l'option a été prise de commencer les grands travaux par là. On ignore encore à peu près tout de la manière dont a été formulé ce programme peu banal, visant à combiner un théâtre en plein air et un stade avec tribunes monumentales. Une hypothèse serait que l'architecte a voulu tirer parti du profil du terrain pour y inscrire la cuvette d'un théâtre en plein air, en fermant cet espace au moyen d'une grande façade décorative bien visible depuis l'hôtel, à laquelle il pouvait



Figure 2 : Georges Hobé en 1910[8]

adosser tribunes et gradins d'un stade assez particulier, puisqu'il ne devait comporter de tribunes que sur un petit côté, du fait du relief (Fig. 3). C'était aussi la première fois que Hobé utilisait le béton armé à cette échelle, même si cette technique était en faveur auprès des instances des Travaux publics. Quoi qu'il en soit, il a choisi d'adosser au volume fermant le théâtre un gradinage (tribunes « populaires ») dominé par une galerie couverte (tribune « VIP »), elle-même surmontée d'une terrasse accessible au public, le tout dominant l'esplanade (Fig. 4).

Sur cette base, le projet de l'architecte s'est affiné, avec notamment la disposition en arc de cercle de grand rayon côté esplanade, avec un travail soigné en coupe transversale, optimalisant les circulations internes et les espaces servants, dans une configuration monumentale émancipée des styles

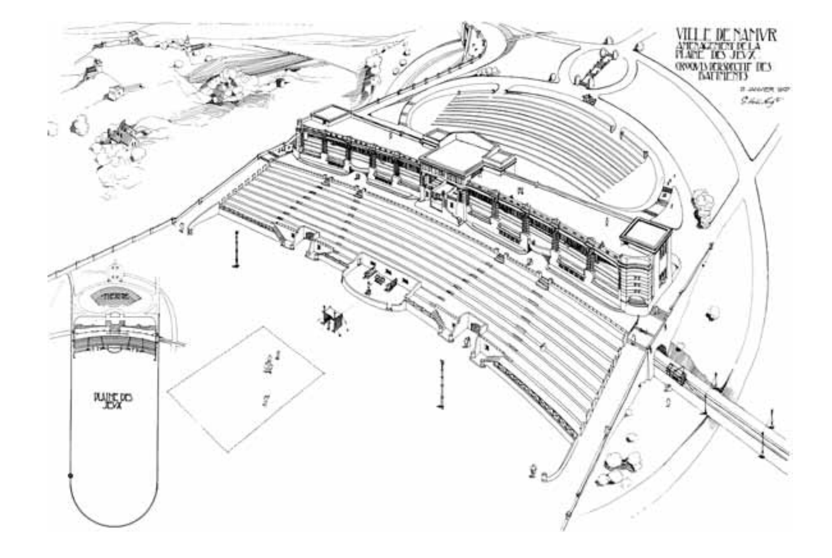



Figure 3 : Vue en perspective du Stade des jeux et du Théâtre en plein air, 15 janvier 1907[9]



Figure 4 : Le Stade des jeux tel que publié dans « Le Béton Armé »[10]

académiques, et agrémentée de particularités volumétriques dans les façades, pour une meilleure lisibilité du fonctionnement de cet organisme complexe. En cours d'étude, un tunnel pour tramway a été ajouté sous le promenoir du stade, intelligent by-pass quels que soient les manifestations ou les spectacles. D'autres modifications sont intervenues entre l'avant-projet définitif (1907) et les plans d'exécution, visant toutes à la réduction des coûts. Les dimensions ont ainsi été revues à la baisse, et le revêtement de pierre prévu pour les façades a fait place à un enduit de type « simili-pierre », quelques détails fonctionnels étant maintenus en pierre de taille.

## BÉTON ARMÉ ET EXIGENCES DÉCORATIVES

Une partie de la construction était à établir directement sur la roche, tandis qu'une autre appelait un remblai, ce qui a conduit à créer un grand mur de soutènement avec contreforts intégrés côté Meuse, et à fonder une partie du bâtiment sur d'épais massifs de maçonnerie de pierre ou de « gros béton ». Le principe de base était celui d'un béton structural avec surfaçage des parties vues, tantôt d'un simple enduit de finition, tantôt d'un enduit décoratif moulé. D'une manière générale, les finitions décoratives accompagnaient les éléments structuraux issus du calcul, mais des poutres ou des poteaux non structuraux ont été ajoutés pour que leur traitement décoratif contribue à la structuration de l'espace (poutres au haut des galeries couvertes, poteaux dédoublés formant paires de colonnes).
Le chantier (Fig. 5) a été adjugé le 13 mars 1908 à l'ingénieur d'entreprise français Maurice Prax (1872-1952), concessionnaire Hennebique et Compressol, connu pour avoir réalisé la passerelle Mativa à Liège (où il s'est fixé en 1904), et déjà en charge de travaux à Namur, comme la construction de la passerelle de Salzinnes.

L'usage du béton armé était alors réputé d'avant-garde dans le grand public, mais il était d'usage répandu dans les champs du génie civil, le premier brevet Hennebique remontant à 1892, et l'Exposition universelle de Paris 1900 ayant été l'occasion d'une large diffusion de différents systèmes de béton armé.
D'une façon générale, aucune prouesse technique n'a été tentée à Namur, le béton armé ayant été choisi pour l'économie de matière et la rapidité d'exécution. Mais l'ouvrage avait aussi à remplir une fonction symbolique. Georges Hobé étant un indéfectible défenseur de ce que l'on appelait alors « les arts décoratifs modernes », il s'est employé à leur mise en œuvre en conciliant de manière avenante les exigences constructives et le désir d'un « style moderne ».
Outre la manière dont il articule le site, voire le paysage, notamment par l'effet de continuité entre cheminements internes et externes, le bâtiment principal est un grand corps creux dévolu au service et à la circulation, dont les attraits principaux tiennent à deux espaces majeurs, pratiquement dos à dos, et comme sertis dans le déploiement des façades correspondantes : la Loge royale (Fig. 6) et la scène du Théâtre (Fig. 7).

Figure 5 : Vues du chantier du Stade des jeux[10]







Figure 6 : Carton édité pour l'inauguration[8]






Figure 7 : Carte postale montrant le Théâtre en plein air[8]

Côté esplanade, les pilastres de part et d'autre de la loge sont ornés de motifs géométriques sans doute influencés par Raimondo d'Aronco (Turin 1902). Les formes circulaires concentriques évoquant le Bouclier de Brennus et la maxime *Ludus pro Patria*, inscrite au fronton, renvoient au renouveau olympique initié par Pierre de Coubertin. À l'opposé, les paires de colonnes qui encadrent l'espace scénique sont surmontées des mascarons de la Comédie et de la Tragédie. Dans ces deux façades, les colonnes cannelées sont surmontées de chapiteaux au dessin et à la plasticité remarquables de nouveauté. La silhouette générale du bâti est marquée par un traitement spécifique des extrémités contenant les escaliers donnant accès à la terrasse supérieure, avec affirmation de masses architectoniques cadrant la composition.
D'autres éléments peuvent être mis en exergue, comme un logement de concierge, les deux fosses d'orchestre, les entrées des remises, les rampes en pas d'âne, les petits pavillons de l'entrée haute du Théâtre en plein air ou une tourelle à l'extrémité du muret délimitant l'esplanade vers la Meuse, mais aussi tous les garde-corps, barrières et tourniquets incorporés aux circulations, les dispositifs scéniques démontables ou encore les exceptionnelles briques de verre « Marke Faust » qui ferment et décorent les baies fixes.
Hobé a livré un bâtiment non seulement de conception nouvelle et fonctionnelle, mais complètement équipé et doté d'abords ressortissant au concept global.
Au nombre des constructions contemporaines de cette ampleur, avec un usage important de béton armé et une recherche d'une modernité nourrie d'une réflexion sur la tradition constructive, on peut citer la Salle royale de La Renommée à Liège, par Paul Jaspar (1904), ou le Grand Hôtel Bellevue à Westende-Bains, par Octave Van Rysselberghe (1911).

## FONCTIONNEMENT, ABANDON ET SITUATION ACTUELLE

Cet ensemble était adapté avant tout à la belle saison, étant d'une certaine manière complémentaire au nouveau *Kursaal*, même si l'esplanade se prêtait à des activités moins liées au beau temps, comme les exercices militaires ou les expositions horticoles. Avec la construction de cinémas et bientôt de stades de football et d'athlétisme, le centre de gravité des activités culturelles et sportives s'est progressivement déplacé.

Des problèmes d'étanchéité se sont aussi posés assez vite, surtout au niveau des gradins du stade, pour lesquels la réception définitive n'a pas été octroyée à l'entrepreneur. Un nouveau surfaçage cimenté a été posé en 1924, mais les trop faibles pentes et des évacuations insuffisantes ont induit un vieillissement rapide, accentué par le manque d'entretien.

Plus tard sont arrivés cirques ambulants et sports moteurs (gymkhanas automobiles ou moto-cross). La présence récurrente de chapiteaux sur l'esplanade, ou du Festival Verdur Rock, montrent aujourd'hui à l'évidence que l'endroit a gardé un potentiel, mais qui appelle une politique entreprenante de restauration et de programmation, notamment à l'intérieur, où, grâce au tunnel, existent d'intéressantes opportunités pour une utilisation plus rationnelle et plus dynamique de l'endroit.
Les dégradations ont imposé en 2011 une interdiction temporaire d'accès, la sécurité des promeneurs n'étant plus assurée (Fig. 8).
Dans la foulée, des fiches d'état sanitaire ont été commandées à l'agence Gatier[1], à Paris. Architecte en Chef des Monuments Historiques,






Figure 8 : Vues récentes du Stade des jeux[11]

en charge notamment de plusieurs bâtiments de Le Corbusier, Pierre-Antoine Gatier a proposé une série de mesures de sauvegarde qui ont permis de rouvrir le site au public, après mise en évidence d'autres travaux à entreprendre. L'année 2010 a été marquée par une exposition consacrée à Georges Hobé, avec présentation de deux grandes maquettes réalisées pour la circonstance, l'une du Stade/Théâtre, l'autre du *Kursaal*, mais avec aussi un déficit scientifique et l'absence d'une publication de vulgarisation.

L'ensemble conçu par Georges Hobé se prête à une très belle étude de restauration et de réaffectation, avec à la clé un chantier modèle eu égard à la période concernée dans le panorama de l'architecture moderne. Les faits imposeront sans doute pour les gradins du stade une reconstruction complète, car il faut savoir que les remises qu'ils abritent ne sont plus utilisables. Un gunitage ayant été pratiqué sur la face inférieure des poutres et des dalles, de même qu'autour des poteaux, sans remédier aux causes des dégradations, le processus de corrosion/carbonatation s'est irrémédiablement accentué, avec pour conséquence la pose d'étais sur une trame serrée, interdisant toute utilisation de ces vastes espaces (Fig. 9). Un problème comparable se pose sous la scène. Des tassements différentiels ont par ailleurs occasionné une grande fissuration transversale, avec désordres subséquents dans la poutraison. Aucun traitement curatif des aciers corrodés n'ayant été effectué, la dégradation générale a empiré, accentuée ponctuellement par d'autres défauts d'étanchéité.

Figure 9 : Étaiement et gunitage des dalles formant le gradinage du Stade des jeux[12]





Si les premières mesures prises à l'instigation de l'agence Gatier ont interrompu ce cercle vicieux, il s'avère plus que nécessaire de voir plus loin, et de mettre à l'étude non seulement la partie technique, mais aussi la partie économique. Cet ensemble monumental, on ne va pas le restaurer pour le restaurer, mais pour l'incorporer à un dispositif culturel, social et économique de revalorisation du site dans son ensemble. Et là, une autre priorité s'impose, à savoir la remise en état des quelques 4 500 m de remparts, dont l'abandon et la détérioration étaient bien plus graves, et qui ont aussi fait l'objet de fiches d'état sanitaire ; ces travaux ont été entamés en 2011 et se poursuivront en onze phases, en principe jusqu'en 2022. Il serait préjudiciable d'attendre cette date pour commencer le chantier de l'ensemble de Hobé.

## MATÉRIEL ARCHIVISTIQUE ET RENOUVELLEMENT DE L'IMAGE DU SITE

Après un premier cri d'alarme en 1999[2], une recherche continue a permis de diffuser différents articles susceptibles de réveiller

l'intérêt des responsables politiques, avec publication en 2010 d'une étude de référence[3] assez fouillée, peu adaptée au grand public. L'intérêt de l'ensemble pensé et construit par Hobé semble aujourd'hui en cours de réévaluation, surtout si on l'imagine remis en état, doté de nouvelles potentialités (avec équipements *ad hoc*). En attendant que le contexte économique soit à nouveau favorable, il serait plus que nécessaire de mettre en chantier une publication de large diffusion (multilingue), dûment documentée et destinée à rappeler les enjeux d'origine en les articulant à ceux d'aujourd'hui. Pour cela, il faut renouveler l'image de l'endroit, par des campagnes de photographie adaptées et par une mise en valeur du matériel archivistique disponible. En d'autres termes, il faut dépasser « le stade de la carte postale », qui renvoie à un paradis perdu ou à des gloires défuntes, et considérer méthodiquement les informations que peuvent délivrer les précieux documents de divers fonds d'archives, pour en tirer du sens pour l'action.

Trois fonds constituent ce trésor encore peu exploité. Le premier, dans les archives de la Ville de Namur, est un lot de quelques centaines de plans de Hobé, inventoriés en 2000 par Alessandra Severi à l'occasion de son mémoire de Master au Raymond Lemaire International Center for Conservation, à Leuven[4]. Le Fonds Hennebique de l'Institut Français d'Architecture à Paris, le deuxième en importance, comporte 21 documents graphiques, dont quelques vues générales en plan et en coupe, ou des plans de coffrage/ferraillage[5], quelques photographies de différentes phases du chantier et une correspondance entre l'entrepreneur et le bureau d'études notamment[6]. Le Fonds Hobé des Archives d'Architecture Moderne à Bruxelles complète cet ensemble : nombreuses feuilles d'étude, détails et plans d'exécution. Ces trois sources permettent de reconstituer un dossier relativement complet, à l'exception notoire des cahiers des charges, dont celui d'une partie du nouveau *Kursaal* qui se trouve dans un fonds privé.

Pour la petite histoire, on peut signaler que la véritable mine d'or que constitue le Fonds Hennebique a donné lieu à plusieurs publications scientifiques, en particulier *Le béton en représentation*, qui a permis de « découvrir » en 1999 que Georges Hobé avait eu recours au Système Hennebique pour le Stade des jeux et le Théâtre en plein air de Namur[7].

## LE CINÉMA THÉÂTRE VARIA À JUMET : QUAND LE BÉTON S'INTRODUIT DANS LE BERCEAU DE L'ACIER. 1917

**Pascal Simoens et Jean-Sébastien Pirnay**

En 2001, l'équipe d'architectes et d'ingénieurs COOPARCH/PIRNAY, sous la direction de Jean de Salle et Marcel Pirnay, est sélectionnée par l'Institut du Patrimoine wallon pour la restauration et réaffectation du cinéma théâtre Varia situé à Jumet, dans la périphérie de Charleroi. Aujourd'hui, après quelques travaux de conservation, l'avenir de ce bâtiment unique semble enfin s'ouvrir à nouveau avec la création d'une bibliothèque de quartier orientée jeunes publics et de locaux associatifs.

Le Varia (Fig. 1 et 2) est un immeuble atypique dans l'histoire belge du béton. Conçu en 1911 par l'architecte liégeois Eugène Claes (1886-1947) et inauguré en 1917, il est inspiré par les Expositions industrielles, internationales et universelles qui se déroulent à Bruxelles (Fig. 3), Liège et Charleroi à la même époque. Dans un premier temps, le béton n'était prévu que pour la réalisation de la façade composée de poutres et colonnes avec remplissage en

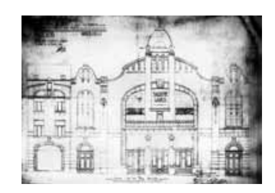


Figure 1 : Plan de façade de l'autorisation de construire du 5 avril 1913[1]



Figure 2 : Le Varia vers 1934.[2]

Figure 3 : Pavillon de la Fabrique Nationale d'armes de Herstal à l'Exposition universelle de Bruxelles 1910, détail de la tour [3]



briques et agrémentée de décors en pierres artificielles à base de ciment, la salle de spectacle de style Art nouveau prévue pour 1 100 spectateurs était conçue en acier et une charpente métallique couronnait l'ensemble. L'Art nouveau qui fleurit à Bruxelles et dans les grandes capitales européennes est vite copié dans les grandes villes wallonnes dont la richesse s'exprime à travers l'architecture privée et publique.

En même temps, cette période riche d'évolutions techniques voit apparaître une révolution dans le domaine du spectacle : le cinéma. Le théâtre Varia de Jumet sera donc aussi un cinéma. Les techniques de projection de l'époque, appelées également films « flamme » doivent leur nom au support de projection en résine inflammable au-delà de 70°C. La conséquence immédiate du changement du programme fut le refus par les services incendie de la ville de Charleroi de la conception métallique du bâtiment. Le béton, déjà prévu pour la façade d'apparat devint l'élément « sauveur » du projet et permit une transformation radicale de la conception de la salle de spectacle. Voici donc un matériau décoratif de façade qui devient l'élément majeur pour la construction de l'ensemble de l'édifice. Étonnamment, malgré cette substitution de dernière minute, le projet s'enrichi par l'exploitation des qualités intrinsèques du béton. Ainsi les balcons sont réalisés en porte-à-faux, supprimant pour l'occasion les colonnes en fonte prévues à l'origine et le toit de l'édifice se pare d'une voûte de 10 cm d'épaisseur à peine, une prouesse à l'époque, couvert d'une toiture plate remplaçant celle à deux versants. C'est donc dans le berceau de l'acier européen continental qu'un immeuble innovant et de surcroît en béton se dessina. Notons toutefois que cet immeuble conserve en lui les stigmates de la conception préalable en acier. Ainsi, la trame de structure du bâtiment est basée sur une maille carrée de 5,10 m de côté, trame habituelle pour les constructions en acier de l'époque.

Lors des études de restauration, des essais ont été réalisés pour déterminer la résistance des bétons des éléments structuraux. Bien que les résistances observées soient faibles comparées aux exigences actuelles, il est apparu que celles-ci étaient conformes aux prescriptions telles qu'énoncées dans de nombreux manuels pratiques édités entre 1864 et 1910[4,5,6]. Des sondages ont mis à jour des colonnes en béton armé de minimum 45 cm de côté avec un pourcentage d'armatures fort important, contenant parfois plus de 70 % d'acier. Ces armatures, suite à leur corrosion, ont été préjudiciables à la bonne tenue du béton celui-ci étant carbonaté sur une grande épaisseur qui atteint parfois 30 cm, voire 40 cm même pour des bétons intérieurs et donc protégés des intempéries. Le gonflement des armatures consécutif à la corrosion a conduit à l'éclatement du béton ce qui a favorisé la progression de la carbonatation. La carbonatation des bétons intérieurs est imputable aux dégagements fréquents de vapeur d'eau et de $CO_2$ de la foule pendant plus de 60 ans. Le Varia peut s'enorgueillir d'avoir accueilli en son sein des acteurs et chanteurs célèbres comme Bourvil, Adamo, Johnny Halliday, Fernandel... soit l'Âge d'or des années 1950 et 1960.

Parallèlement à ces analyses sur la structure en béton armé, un travail important a consisté à définir la jauge (le nombre de spectateurs) potentielle encore admissible eu égard aux règles actuelles de sécurité. Une réflexion a été menée pour réduire les interventions sur le patrimoine tout en garantissant une pérennité de la structure qui ne présente aucun désordre d'origine structural, le béton ayant même une résistance accrue du fait de sa carbonatation[7]. En effet la carbonatation agit de deux manières sur le béton : elle augmente sa résistance à la compression en bouchant les pores du béton et elle réduit son alcalinité et donc la protection des armatures qu'il enrobe. En réduisant la protection des armatures dont la corrosion dégrade le béton, la carbonatation a un effet globalement négatif sur le béton armé.

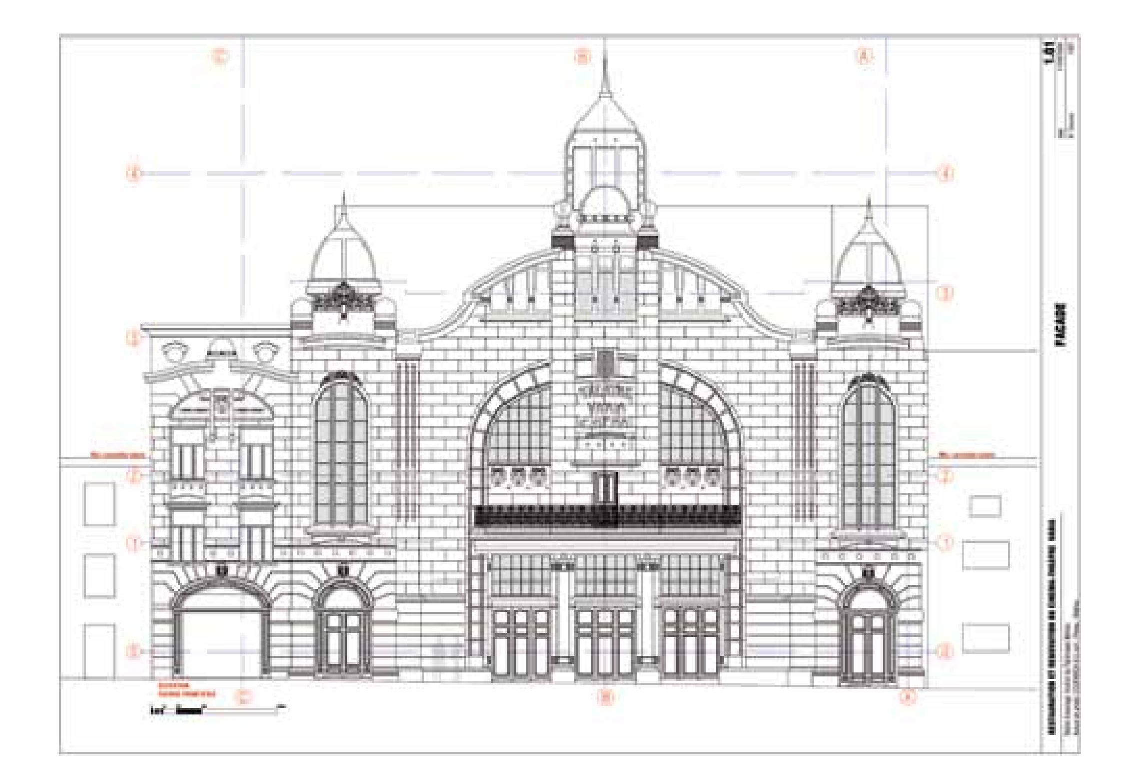



Figure 4 : Plan d'ensemble de restauration de la façade classée[8]

Architectes et ingénieurs sont arrivés à la solution d'une seconde peau respirant selon les usages, soit de l'intérieur vers l'extérieur ou l'inverse, entourant l'entièreté du volume de la salle de spectacle. Cette seconde peau est isolée, ventilée et d'une épaisseur moyenne de 65 cm. Elle intègre également un certain nombre de techniques spéciales. Cette solution permet de préserver l'ensemble des décorations et plâtres intérieurs de la salle et de garder la vision d'origine du spectateur tout en offrant le confort nécessaire à un espace scénique en 2012. Parallèlement, les balcons ne seront plus praticables qu'en partie et afin de répondre aux nouvelles normes de sécurité la jauge passera de 1 100 places à 350 places assises et 500 places debout (parterre). Cette réduction du nombre de places est fréquente dans le cadre de restauration de salles de spectacles. De plus ici un chalenge supplémentaire s'offre aux auteurs de projets par l'intégration de l'espace scénique dans un programme de la bibliothèque de quartier.
Quant à la façade d'apparat, pièce majeure d'une architecture de style Art nouveau typée sécession viennoise, elle sera restaurée à l'identique à l'aide d'un enduit au ciment, similaire à celui d'origine mais d'une composition permettant une meilleure respiration des maçonneries (Fig. 4).

Malheureusement, la question de sa dégradation rapide pose la question cruciale de la restauration des bâtiments récents et faisant usage de techniques encore actuelles : la restauration à l'identique d'un patrimoine contemporain est-elle utile ou bien une aberration historique ? La Charte de Venise est claire sur ce point à partir de l'instant où les données sont suffisantes pour la restitution du patrimoine, en l'occurrence ici les plans, photos et relevés. Pourtant, alors que personne n'oserait toucher à un patrimoine médiéval, force est de constater que le patrimoine du 20ème siècle, lui, pose encore question. Pourtant, celui-ci est extraordinaire à l'échelle européenne et unique en Belgique, même s'il n'a que 95 ans d'histoire.

In fine, le cinéma théâtre Varia est un immeuble exceptionnel par l'expérience qu'il apporte sur l'évolution des bétons des bâtiments pendant presque plus d'un siècle. L'analyse des méthodes de construction de l'époque et l'élaboration des techniques de restauration permettent de renforcer la connaissance des bétons anciens. Parallèlement, le cinéma théâtre Varia démontre que l'histoire ne se limite pas à des processus constructifs. De fait, si ce bâtiment en béton a été construit dans le berceau de la sidérurgie belge, c'est parce que de nouveaux développements sont apparus dans d'autres domaines, ici la projection cinématographique. Le Varia rappelle ainsi l'interaction entre un bâtiment, le contexte urbanistique mais aussi socio-économique. Une leçon d'histoire qui justifia pleinement son classement en 1998.

## LE FORUM À LIÈGE. 1922

**Jacques Barlet**

Oeuvre de l'architecte verviétois Jean Lejaer, le Forum[1] construit en 17 mois, d'avril 1921 au 30 septembre 1922, date de son inauguration, nous donne un autre exemple de salle de spectacle dans laquelle la résistance au feu de la structure est obtenue par l'utilisation du béton armé.




Figure 1 : Façade rue du Mouton-Blanc[2]

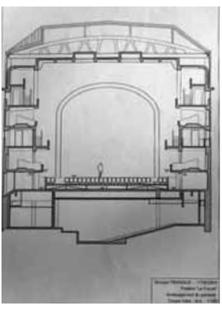


Figure 2 : Coupe transversale[3]

Implanté au Pont d'Avroy et rue du Mouton Blanc (Fig. 1), la salle de ce music-hall devait à l'origine contenir 3 000 places et, en sous-sol, la brasserie « La Feria », 900. En 1947, le sous-sol est réaffecté en cinéma « Le Churchill », fonction qu'il a conservée après les aménagements de 2003 en trois salles, réalisées par l'architecte B. Adam du groupe Triangle. Le groupe Triangle a également été chargé par la Communauté française et l'Institut du Patrimoine wallon de réaménager le parterre du Forum pour améliorer radicalement le confort des spectateurs.

La scène du Forum a une hauteur de 22 m et une profondeur de 15 m. La toiture en béton de la salle, large de 25 m, repose sur les murs gouttereaux sans supports intermédiaires. Seules des colonnettes en fonte supportent les premiers balcons latéraux et les mezzanines. Le plafond est constitué d'un réseau orthogonal de poutres et de dalles en caisson dans lesquelles sont ménagées des ouvertures pour la ventilation et le chauffage.

La toiture est suspendue à des poutres transversales en béton armé à hauteur variable et entre-distantes de 5,2 m (Fig. 2 et 3). Ces structures, à l'origine extérieures au bâtiment, présentent l'apparence d'une poutre en treillis, avec membrure supérieure en arc, membrure inférieure droite et montants inclinés dessinant une triangulation en V. Sous l'action des charges permanentes uniformément réparties, ces structures fonctionnent un peu à la manière d'un arc bow-string, avec les montants inclinés servant alors de suspentes et la membrure inférieure au niveau de la dalle servant de tirant rectiligne. Compte tenu de la forte raideur des montants inclinés et de leur encastrement dans les membrures supérieure et inférieure, le fonctionnement de cette poutre sous l'action des charges variables induit, un peu comme dans le cas d'une poutre Vierendeel, une flexion significative de tous les éléments en sus de leur sollicitation principale en traction ou en compression.

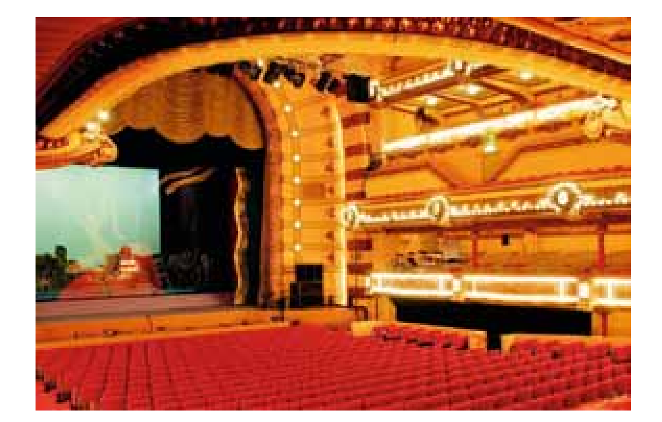
D'après Th. Gobert, « en 1922, la préparation du béton a nécessité 240 000 kg de fer et d'acier, 740 000 kg de ciment et 3 800 000 kg de gravier ». Lors de la restauration de 1987, la réparation des bétons fortement dégradés (Fig. 4) de la structure de toiture a nécessité le décapage, le dérouillage et la protection des armatures avant de procéder à leur réparation proprement dite.



Figure 3 : Structures transversales de support de la toiture[4]



Figure 4 : Dégradation du béton des structures extérieures[5]



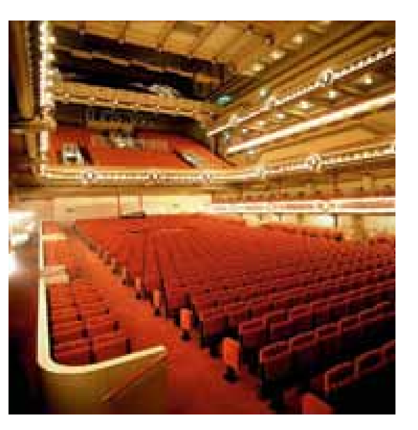


Fig. 5 et 6 : Intérieur de la salle[6]

Le décor de la salle (Fig. 5 et 6) et des circulations, est réalisé en staff et carton-pierre peint et doré, comme dans les grandes salles américaines de music-hall Art Déco de Los Angeles et Hollywood quelques années plus tard et à l'Eldorado à Bruxelles, décor mythique. Le granito, la ferronnerie d'art et le vitrail - essentiellement en plafonnier - interviennent ponctuellement dans le décor.

L'éclairage de la salle était assuré par 15 000 ampoules piquées dans les frises et les moulures, complété par des globes et des appliques en verre moulé aux motifs géométriques et floraux typiques des années 1920. L'installation était alimentée par 90 km de fils sous tubes d'acier ou de fer plombé.

Afin de l'adapter aux impératifs de sécurité, elle a été remplacée par une alimentation basse tension 24 volts, équipée de rhéostats évitant ainsi d'altérer les décors en staff et préservant les effets féériques et intimistes de lumière.

En 1989, la restauration des décors est en voie d'achèvement, lorsqu'il s'avère que la dalle de béton séparant la salle du Forum, du Churchill, trop fragilisée par un réseau de fissures et l'altération des armatures, doit être démolie et remplacée !

En 1965, Jacques Brel avait donné au Forum son concert d'adieu.

## L'ÉGLISE SAINT-AYBERT À BLÉHARIES. 1926

**Eric Hennaut**



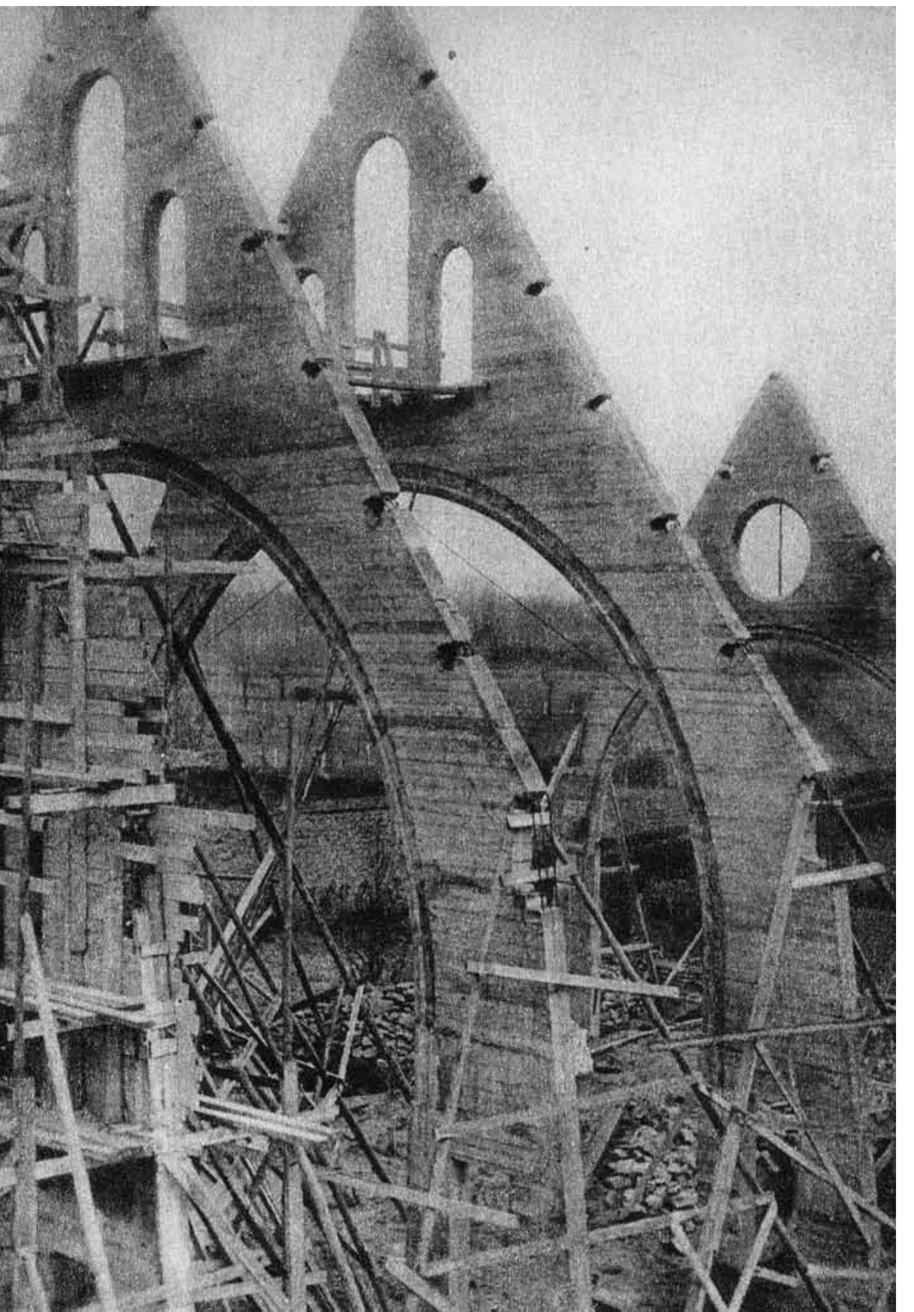
Figure 1 : Vue de la nef[1]

L'église Saint-Aybert à Bléharies (Brunehaut, Hainaut), conçue entre 1919 et 1926 par l'architecte Henry Lacoste (1885-1968), est considérée comme la première église à structure en béton armé apparente de Belgique (Fig. 1). L'importance du bâtiment ne réside pas dans une avancée technologique significative, mais dans la cohérence et l'originalité avec lesquelles les matériaux nouveaux sont adaptés au contexte particulier et jusqu'alors très conservateur de l'architecture catholique, en associant étroitement innovations stylistique, symbolique et technique. Désireux de sortir du carcan des styles historiques, Lacoste développe un processus d'épuration des formes qui conduira à l'une des premières églises modernes du pays. Dans le domaine religieux, l'édifice suit avec subtilité les idées du mouvement de renouveau liturgique dont il constitue probablement la première réalisation pleinement accomplie. Le budget limité constitue une donnée essentielle et

oriente rapidement le projet vers des procédés constructifs modernes peu onéreux : béton armé, ciment, granito.

L'intérêt de Lacoste pour le béton armé et le ciment doit sans doute beaucoup à sa formation en France où, cas exceptionnel parmi les architectes belges de sa génération, il est diplômé de l'École des beaux-arts de Paris (1909-1914). La ville est alors au cœur de la réflexion sur l'esthétique et l'industrialisation du béton armé. François Hennebique y a créé le premier bureau d'étude de béton armé à vocation internationale. Auguste et Gustave Perret, sortis également de l'École des beaux-arts, signent entre 1904 et 1913 une série de bâtiments qui seront considérés comme autant d'étapes majeures dans la naissance de l'architecture moderne en béton armé. Dans le champ plus spécifique des édifices religieux, Anatole de Baudot vient de terminer Saint-Jean-de-Montmartre, première église française dont tous les éléments découlent de l'usage systématique de béton armé (1894-1904). Si sa conception technique est sans relation avec le futur travail de Lacoste, elle montre la possibilité de développer une esthétique sacrée moderne en se fondant entièrement sur l'emploi de matériaux nouveaux.

Figure 2 : L'église en construction - Les arcs-diaphragmes[2]



Conformément aux idées du mouvement de renouveau liturgique, l'intérieur de Saint-Aybert est traité comme un espace unitaire au plan très simple : un rectangle prolongé par un chœur plus étroit à chevet plat. La nef est constituée d'une succession de six grands arcs-diaphragmes semi-circulaires en béton armé de 13 m d'ouverture, 18 m de haut et 30 cm d'épaisseur, espacés de 5 m d'axe en axe (Fig. 2).

Ces fermes permettent une mise en œuvre particulièrement économique, aisée, autonome et répétitive, les coffrages pouvant être repris d'un arc à l'autre. La structure en béton armé est conçue par le bureau Hennebique en 1924, après un avant-projet confié en 1922 au bureau d'études John Soubre de Liège.

Pour le couvrement (Fig. 3), Lacoste choisit, par contre, d'assembler des éléments en béton armé moulés d'avance, moins coûteux qu'un coffrage exécuté sur place : les grands arcs

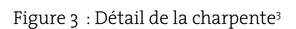
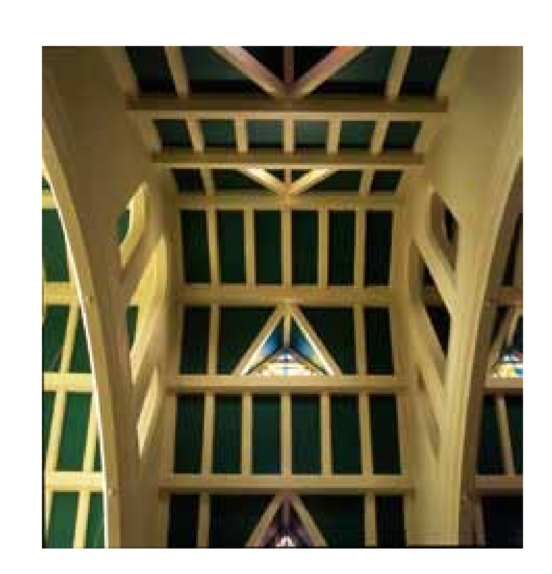


Figure 3 : Détail de la charpente[3]



supportent des pannes, dans lesquelles sont encastrés des chevrons, qui servent de cadre à des caissons.

Lorsqu'il pénètre dans l'église, le visiteur est saisi par la luminosité de la nef (Fig. 1) où l'enfilade des arcs dirige immédiatement le regard vers l'autel. Cette clarté provient surtout d'un dispositif inhabituel de trente lucarnes triangulaires en béton armé, disposées en trois rangs sur la pente de la toiture.

L'emploi du béton est accusé avec franchise ; les arcs-diaphragmes, les pannes et les chevrons sont simplement enduits et peints en blanc, tandis que les caissons reçoivent un ton vert qui souligne l'ossature de la charpente. Pour l'extérieur, Lacoste adopte des matériaux traditionnels d'origine locale (moellons, brique, pierre de taille, grès émaillé) qui s'inscrivent de manière plus harmonieuse dans le cadre architectural environnant et offrent une pérennité mieux adaptée à la vocation de l'édifice.

La modernité de la structure se prolonge de manière pleinement cohérente dans l'aménagement intérieur, conçu presque entièrement en béton et en mortier de ciment. Les murs de la nef et du chœur sont couverts de hauts lambris réalisés dans un nouveau matériau aujourd'hui presque oublié, le Lap (Fig. 4).

Mis au point et breveté en France au début des années 1920, il est constitué de mortier à base de ciment alumineux et teinté dans la masse, coulé en plaque dans un moule poli de manière à obtenir une surface lisse et brillante. Outre son caractère hygiéniste, résistant et peu coûteux, il permet une large gamme chromatique parmi laquelle Lacoste choisit une alternance de bandes verticales vertes et rouges sombre, couleurs complémentaires qui servent de transition entre la couverture de la charpente et le mobilier.

Tout le mobilier liturgique fixe est coulé en béton et recouvert de granitos aux couleurs exceptionnellement raffinées. Comme le montre une photographie de chantier, la chaire est une structure en porte-à-faux accrochée à l'un des arcs-diaphragmes. Les éléments les moins importants, chaire, confessionnaux, balustrade, ambons, ont pour base un granito rouge pourpre (complété par des plages beiges et vertes) qui se fond en partie dans la tonalité des lambris (Fig. 4). Les autels et les fonts baptismaux qui matérialisent les deux sacrements sur lesquels le mouvement de renouveau liturgique souhaite remettre l'accent, la communion et le baptême, se détachent dans une étonnante couleur bleue, annoncée par quelques touches aux abords du chœur.



Figure 4 : Vue du mobilier en granito et des lambris en Lap dans le chœur[4]

Le choix du granito, matériau pauvre souvent destiné aux programmes modestes, pour les parties majeures de l'église est alors particulièrement audacieux. Il dépasse les idées du mouvement de renouveau liturgique qui est favorable à une modernisation stylistique de l'art religieux, mais reste attaché à la valeur symbolique des matériaux traditionnels et au « supplément d'âme » que leur apporte le travail manuel. Dans la lignée du courant rationaliste français, Lacoste considère au contraire l'architecte comme seul responsable de la qualité d'une œuvre, usant d'une pratique artisanale ou de procédés industriels selon le programme, les moyens matériels et financiers, sans que ces options puissent infléchir la valeur de l'édifice.

Consacrée le 17 octobre 1926, l'église est saluée de manière unanime comme l'une des réalisations les plus novatrices de l'architecture religieuse en Belgique. Jusqu'à la fin des années 1930, elle sera reprise dans la plupart des ouvrages francophones consacrés aux églises du 20ème siècle. Le bâtiment a été classé comme monument le 19 mai 1993.

## LE MÉMORIAL INTERALLIÉ DE COINTE : ENTRE COMMÉMORATION CIVILE ET RELIGIEUSE. 1936-1937

**Hugo Claes et Sébastien Mainil**

Implanté sur la colline de Cointe, sur les hauteurs de Liège, le Mémorial Interallié domine la ville et marque le paysage de sa silhouette caractéristique où se succèdent coupole, tour et pylônes (Fig. 1)

### À L'ORIGINE DU PROJET

Au lendemain de la Première Guerre mondiale se développe parmi les populations européennes un sentiment de reconnaissance à l'égard des soldats alliés et une volonté de rendre hommage aux victimes. Différents projets commémoratifs, notamment à Liège, l'une des premières villes belges à avoir affronté les troupes allemandes, n'aboutissent pas (citons, à titre d'exemple, le projet de Paul Jaspar sur la Place du Marché à Liège).

Né de la fusion de deux projets à l'origine bien distincts, l'un à caractère civil et patriotique (suite à une décision du Congrès de la Fédération Interalliée des Anciens Combattants), l'autre à dimension religieuse (émanant d'un souhait d'établir une église paroissiale et de pèlerinage dédiée au Sacré-Cœur-de-Jésus), le projet du Mémorial Interallié voit le jour en 1923 (Fig. 1).

Financé exclusivement par des souscriptions publiques lancées dans les différents pays alliés, il fait l'objet d'un concours d'architecture, remporté par l'architecte anversois Jozef Smolderen. Plusieurs versions sont proposées.

Figure 1 : Vue général du site du Mémorial Interallié[1]



Le projet définitif retenu est caractérisé par une première esplanade formant l'avant-plan du monument civil et donnant accès à une vaste salle en plein air entourée de huit puissants pylônes à fonction décorative. Cette « salle des pylônes » est reliée à la tour par une galerie en hémicycle. La tour, monument civil, a été conçue comme un gratte-ciel d'une hauteur de 75 m, défi architectural à la fin des années 20. Une seconde esplanade constitue le parvis du monument religieux.

### LE MONUMENT CIVIL

La tour (Fig. 2) est constituée d'une salle haute et d'une salle basse, appelée « crypte », abritant les monuments commémoratifs des nations alliées.

Ces deux salles sont surmontées de huit étages supplémentaires dont certains présentent un aspect inachevé: les briques des murs et le béton de la structure sont laissés apparents (sans plafonnage). Un évidement central de forme octogonale perce le plafond des sept premiers niveaux, révélant ainsi, de l'intérieur, la hauteur du monument. Une balustrade en fonte de style Art Déco borde cet évidement aux trois premiers niveaux.

Deux ascenseurs successifs et d'étroits escaliers assurent le passage d'un étage à l'autre. Une coursive aménagée au sommet de la tour permet de découvrir un panorama sur toute la périphérie liégeoise

La tour du monument civil, avec son élévation aux lignes pures, ses baies aux formes stylisées qui se répètent, les volumes géométrisées qui s'accrochent à sa base est un clair témoin de l'Art Déco. À l'intérieur, les éléments de décoration (balustrades en fonte, motifs des pavements, dessins des portes), ainsi que l'organisation des plans (un octogone inscrit dans un carré) exploitent la stylisation géométrique.

Le procédé de construction, une ossature en béton armé encastrée dans un radier, et le type même de construction, un gratte-ciel, font preuve de modernité en exploitant des techniques et matériaux nouveaux dont le béton armé.



Figure 2 : Le monument civil[1]

Lors de l'étude du projet, l'existence probable d'anciens travaux miniers et la présence d'une importante veine de charbon avaient été envisagés. Lors du chantier, la nature du sous-sol fut précisée. Le terrain était parsemé de galeries d'exploitation peu profondes, remblayées par l'homme ou comblées par affaissement naturel. Sa consolidation fut réalisée par forages et injections (un forage central et quatre forages d'angle de 12 m de profondeur injectés de coulis de ciment). Ces travaux engloutirent une part importante des fonds rassemblés. Faute de moyens suffisants, seule une partie des travaux projetés furent mis en œuvre. Les finitions intérieures des étages de la tour et l'aménagement complet des abords ne furent jamais réalisés.

Un radier carré de 11,50 m de côté a été exécuté avec un évidement central carré, de manière à réduire au minimum les terrassements dans le schiste dur. Huit colonnes en béton armé sont encastrées dans ce radier, deux sur chaque côté. Elles forment l'ossature du bâtiment.

Le revêtement extérieur a été réalisé en pierre dite « Mézangère », provenant des environs de Commercy, posée au fur et à mesure. Ces pierres ont été taillées sur le chantier et montées à l'aide d'une grue.

## LE MONUMENT RELIGIEUX

Le monument religieux (Fig. 3), haut de 54 m, présente un plan centré, presque en croix grecque. Il se compose d'une abside et de deux chapelles axiales. L'entrée principale, opposée à l'abside, forme une importante avancée créant ainsi une symétrie. Quatre chapelles diagonales viennent également se greffer au noyau central.

Le sol de l'église repose sur un système de poutres disposées en étoiles, elles-mêmes supportées par les colonnes en béton armé de la crypte. Jusqu'à la naissance des coupoles, l'édifice est conçu en maçonnerie et revêtu de moellons et de pierres de taille. Certaines parties, laissées inachevées, sont enduites ou recouvertes d'un bardage métallique. Les planchers des tribunes sont réalisés en hourdis nervurés en béton armé.

Une coupole de style néo-byzantin coiffe l'ensemble. Il s'agit en réalité d'un ensemble de deux coupoles superposées de (très) faible épaisseur, non nervurées et reliées entre elles par un cône intermédiaire, permettant une prise de lumière zénithale. L'ensemble est recouvert de feuilles de cuivre laminé.

Le Mémorial (tour, esplanade et église) a été classé le 24 janvier 2011 comme monument. La Tour a fait l'objet entre 2007 et 2012 d'une restauration extérieure et intérieure par la Régie des Bâtiments.

Les travaux d'aménagement et de valorisation de l'esplanade sont en cours. L'église, aussi dénommée de manière erronée « basilique », connaît aujourd'hui d'importantes dégradations et fait l'objet de préoccupations quant à sa conservation et sa réaffectation.

Figure 4 : Le monument religieux – coupe verticale[4]

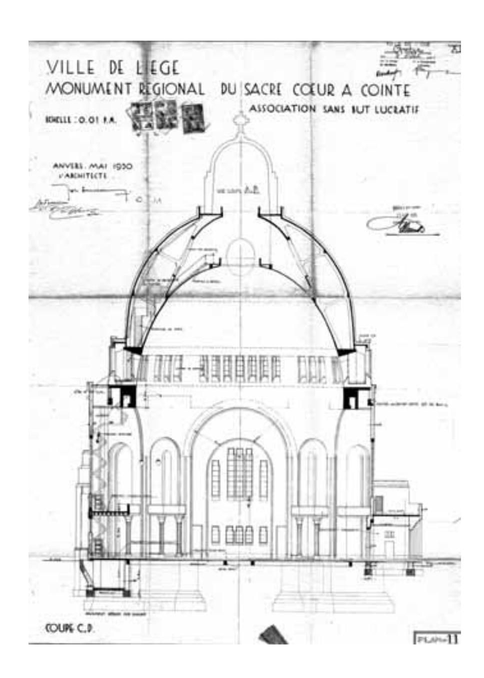
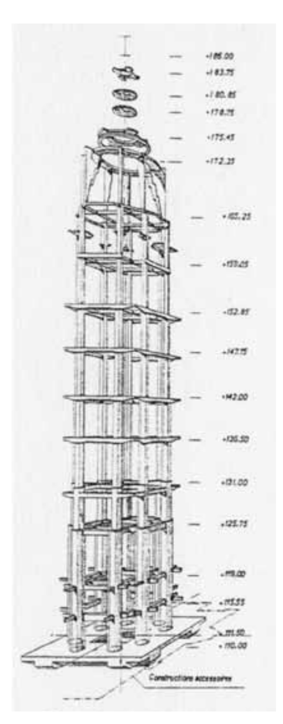



Figure 3 : Squelette en béton armé du monument civil[3]



## LA *BOEKENTOREN* DE L'UNIVERSITÉ DE GAND. 1936-2016

**David Dewolf**

### LA CONSTRUCTION DE 1936

C'est à l'âge de 70 ans que Henry van de Velde (1863-1957) reçoit en 1933 la commande pour la construction de la nouvelle bibliothèque universitaire de Gand. Henry van de Velde pense immédiatement à la construction d'une tour pour y loger les livres (Fig. 1). Construit sur la Blandijnberg, le point culminant de la ville, cette quatrième tour de Gand symbolise la science et la connaissance et est, jusqu'aujourd'hui, l'emblème de l'université. Le bâtiment est classé depuis 1992.

Henry van de Velde s'inscrit parmi les artistes 'complets' et, outre l'architecture, il conçoit le mobilier, les menuiseries, la quincaillerie, les finitions de sol, etc. L'utilisation du béton armé non seulement comme matériau de structure, mais également comme parement, autrement dit le passage du béton armé au béton armé apparent, est résolument moderne pour l'époque. Henry van de Velde peut compter sur la collaboration de deux spécialistes du béton armé : les professeurs Gustave Magnel et Jean-Norbert Cloquet.

Les plans définitifs sont introduits en 1935 et, en 1936, l'entreprise Gillion de Bruxelles entame le chantier. La technique du coffrage glissant est utilisée pour la première fois en Belgique.

Figure 1 : La *Boekentoren* de l'Université de Gand[1]

### LE PROJET COMPORTE DEUX TYPOLOGIES DIFFÉRENTES

La tour de 64 m de haut abrite 3 000 000 de livres. Construite sur un plan carré de 20 m, elle compte quatre niveaux sous terre, vingt étages et est couronnée par un magnifique belvédère vitré. Le plan est subdivisé par un maillage serré de colonnes pour supporter la charge importante des étagères. Les voiles extérieurs sont en béton armé de 18 cm d'épaisseur, ferraillés de manière traditionnelle avec un enrobage de ± 10 mm.

Les bâtiments bas comprennent différentes salles de lecture, un cabinet de cartes et un cabinet de manuscrits ainsi que toute une série de bureaux. L'ensemble ne dépassant pas les trois à quatre étages, est constitué d'une structure poutre-colonne dessinée sur une maille de 4 m sur 4. Les façades, également en béton apparent, ne sont cependant pas monolithiques. Elles sont composées d'un voile de parement extérieur de béton armé de seulement 8 cm d'épaisseur, d'une lame d'air de 3 cm et d'une cloison en brique de 9 cm à l'intérieur. Le voile de parement de 8 cm n'est armé que d'un seul treillis à mi-épaisseur.

### LA DÉGRADATION DES BÉTONS

Les premiers signes de carbonatation du béton apparaissent dans les années '60. Il fut décidé de recouvrir les façades en béton d'un enduit mince à base de résine époxy, matériau expérimental pour l'époque. Le bâtiment, conçu en béton apparent, perdit son allure initiale, mais l'évolution des dégradations fut maîtrisée.

Aujourd'hui, pour la tour, des tests indiquent un front de carbonatation à 25 à 30 mm de profondeur, soit largement dans la zone ferraillée.

Les essais de carbonatation indiquent pour les bâtiments bas un front de carbonatation moins profond, de l'ordre de 15 à 20 mm. Du fait de l'enrobage important (35 mm), le ferraillage reste hors de la zone carbonatée.

## LA RESTAURATION PROJETÉE POUR 2016

Malgré l'intervention de 1960, une restauration complète du bâtiment s'impose aujourd'hui. En 2006, l'Université de Gand lança un concours à cette fin. Parmi les cinq finalistes, l'Association Momentanée Robbrecht en Daem / Van der Wee / Sum Projects / Daidalos Peutz / Bureau d'Études Greisch / VK Engineering remporta le projet en mars 2007.

Le choix de l'équipe lauréate est de construire un nouveau dépôt enterré, de purger le béton malade et de rendre l'apparence initiale du bâtiment, à savoir un béton apparent à coffrage lisse.

La visite de l'église Saint-Antoine à Bâle, première église en béton (1925-1927) de Suisse (Architecte Karl Moser) et restaurée en 1981 conforta le bureau Greisch dans ce choix. La couche extérieure y a été décapée au marteau pneumatique léger sur une profondeur de 4 cm avant de recouler du béton sur une épaisseur de 7 cm. Cela implique un décalage du plan de façade de 3 cm vers l'extérieur par rapport au plan initial. L'utilisation d'un béton traditionnel imposa des hauteurs de bétonnage de 90 cm pour des raisons de mise en œuvre. Des ancrages mécaniques garantissent l'accroche de la nouvelle couche à la masse existante. Le coffrage voligé permet de combler toute une série de défauts de mise en œuvre et de fissuration. Néanmoins, cette restauration, vieille de trente ans, permet de valider la technique et a démontré sa tenue dans le temps. De plus, deux nouvelles techniques fondamentales pour la restauration sont apparues : l'hydrodémolition et le béton auto plaçant.

Figure 2 : Hydrodémolition (essai sur site) [2]



L'hydrodémolition (Fig. 2) est, comme l'indique son nom, la démolition à l'eau sous haute pression. Les pressions d'eau varient entre 500 et 2 000 bars pour des débits entre 30 et 200 litres/minutes. En faisant varier différents paramètres, il est possible de décaper le béton sur une profondeur de 0,5 cm à 1 m. Mais l'avantage principal de l'hydrodémolition est de ne pas affaiblir le béton restant. En effet, l'eau s'engouffre dans les interstices du béton sous haute pression et fait imploser la couche extérieure du béton sans vibrations. Cette technique diffère fondamentalement de celle du marteau piqueur qui crée des fissures dans le béton. En déplaçant le burin de place, d'autres fissures sont créées. C'est la jonction de différentes fissures qui fait éclater le béton. Après l'opération, le béton restant est fortement fissuré et donc affaibli. Autre avantage de l'hydrodémolition est la surface rugueuse obtenue après l'opération. L'augmentation significative de la surface de contact accroit considérablement l'adhérence entre le nouveau béton et l'ancien béton.

Un béton destiné à être apparent nécessite une mise en œuvre irréprochable. Grâce à la faible viscosité du béton auto-plaçant obtenue par l'ajout d'additifs, une couche rapportée de faible épaisseur permet d'éviter les nids de gravier.

Pour la tour (3 300 m²), où le ferraillage est dans la zone carbonatée, un décapage de 6 cm sur les 18 cm est prévu. Après dépose et repose du ferraillage, une nouvelle couche extérieure de béton est coulée sur la même épaisseur de 6 cm (Fig. 3). Bétonner 2,25 m, la hauteur d'un étage, sur une épaisseur de 6 cm est rendu possible uniquement par l'usage d'un béton auto-plaçant.

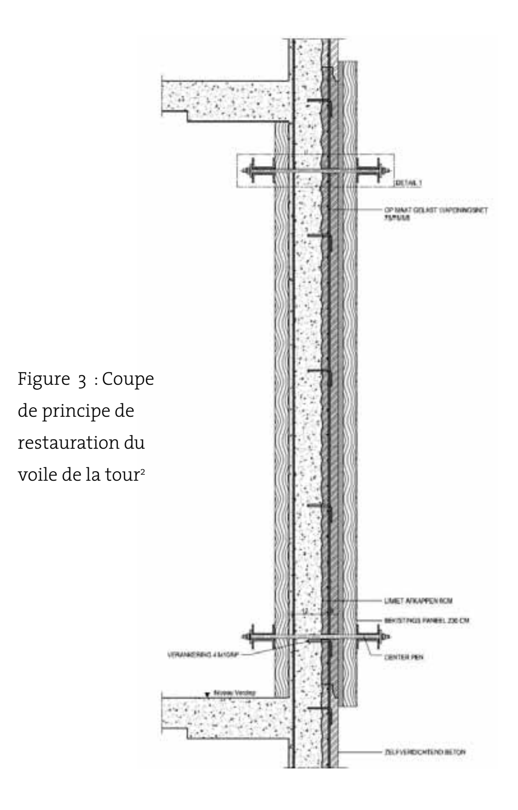
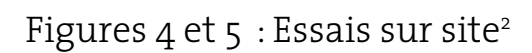



Figure 3 : Coupe de principe de restauration du voile de la tour[2]

Pour les bâtiments bas (4 300 m²), seuls 2 cm doivent être décapés sur les 8. La nouvelle couche de 4 cm d'épaisseur nécessite le décalage du plan de façade de 2 cm vers l'extérieur. Cela implique la dépose et repose de toutes les pierres de couronnement, des seuils de fenêtre et autres pierres naturelles. Cependant, la lame d'air et la cloison intérieure en briques posent une difficulté complémentaire. En effet, la fixation du coffrage et la reprise de la poussée hydrostatique du béton frais ne peuvent se faire que dans la croute en béton restante de 6 cm d'épaisseur. Pour cela, un système de goujon d'ancrage a été mis au point servant de support et d'écarteur de coffrage, reprenant la poussée hydrostatique et assurant une liaison mécanique entre le nouveau et l'ancien béton. Les hauteurs de bétonnage sont limitées à 1,15 m pour limiter les pressions du béton frais.

Des essais en atelier et sur site (Fig. 2, 4 et 5) ont démontré la faisabilité de la restauration. Le dossier d'adjudication fut lancé en août 2012 et les entreprises remirent prix en octobre. Mais les offres étaient plus élevées que l'estimation. Néanmoins, les deux moins-disants présentaient un prix pour les postes de stabilité conforme à l'estimation. Les travaux qui feront probablement l'objet d'une réadjudication sont prévus pour la période août 2013 - juin 2016.



Figures 4 et 5 : Essais sur site[2]





## RÉFÉRENCES


**A. Van Loo - Premiers bétons et écriture architecturale : la ville nouvelle d'Héliopolis. 1905-1922**
[1] Crédit photographique : Michel Louis
[2] Collection privée.
[3] Crédit photographique : Jacques Saucin
[4] Crédit photographique : Michel Louis
[5] Ilbert R. (1981). Héliopolis Le Caire 1905-1922. *Genèse d'une ville*, Marseille : CNRS
[6] Piaton C., Volait M. (2003). L'identification d'un ensemble urbain du XXe siècle en Égypte : Héliopolis, Le Caire, *InSitu*, 3.
[7] Stegen G. (2010). La préservation du Palais hindou, perspective d'avenir, dans Van Loo A., Bruwier M.-C. (dir.), *Héliopolis*, Bruxelles : Fonds Mercator, 146-147.
[8] Van Loo A. (2010). La nouvelle Héliopolis. Invention d'une ville-jardin dans le désert, Le Palais hindou, un chantier de cinq ans et De l'oasis à la ville, l'unité dans la diversité dans Van Loo A., Bruwier M.-C. (dir.), *Héliopolis*, Bruxelles : Fonds Mercator, 110-125, 130-145, 148-167.

**R. Balau - L'ensemble du stade des jeux et du Théâtre en plein air de Namur : Georges Hobé, Maurice Prax et le système Hennebique. 1906-1910**
[1] Fiches d'état sanitaire de l'Agence de Pierre-Antoine Gatier pour la Ville de Namur (équipe de la Citadelle).
[2] Balau R. (1999). Georges Hobé : architectures-paysages, Kykhill - La Panne (1898), Grands Travaux - Namur (1905-1914), *A+ Architecture*, 160, 46-59.
[3] Balau R. (2010). Namur 1893-1913. La S.A. Namur-Citadelle et le projet urbain de Georges Hobé, *Études et Documents* 9, Namur : SPW - D.G.O.4
[4] Severi A. (2000). *Le Stade des jeux et Théâtre en plein air de Georges Hobé à la Citadelle de Namur*, mémoire de la Faculteit Toegepaste Wetenschappen R.L.I.C.C., K.U.L., Leuven.
[5] Base de données en ligne de l'I.F.A., Archiwebture, Fonds Hennebique, BAH-24-1907-08592, Stade des jeux de la Ville, Namur (Belgique), tribunes. 1907-1910. Dans l'état actuel de l'inventaire, les autres dossiers traités par Hobé sont : BAH-24-1906-23501 (aménagement urbain, Bouillon, 1906-1911), BAH-24-1906-23684 (immeuble n.i., Belgique, 1906), BAH-24-1902-08922 (élargissement boulevard Ad Aquam et pont sur la Sambre, Namur, 1902-06), BAH-24-1909-26179 (salle de concert de Somzée, Schaerbeek, 1909), BAH-24-1914-21999 (tennis du *Kursaal*, Middelkerke, 1914), BAH-24-1914-22066 (immeuble n.i., Ans, 1914).
[6] S.n. (1910). Le Stade des jeux de Namur (Belgique). *Le Béton Armé. Organe des concessionnaires et agents du système Hennebique*, 13, 4-5.
[7] Delhumeau G., Gubler J., Legault R., Simonnet C. (1993). *Le béton en représentation. La mémoire photographique de l'entreprise Hennebique 1890-1930*, Paris : Hazan, Institut Français d'Architecture. Deux photographies (p. 51, Fig. 45 et Fig. 46) montrant d'une part un panneau du stand Hennebique à l'Exposition universelle de Gand 1913, où l'on aperçoit les tribunes du stade, et d'autre part un schéma les identifiant.
[8] Collection particulière. Crédit photographique : Luc Schrobiltgen.
[9] Archives d'Architecture Moderne
[10] Fonds Hennebique, Institut Français d'Architecture, Paris. Clichés Gilles et Debry, 1909-1910
[11] Crédit photographique : Guy Focant, SPW, DPatrimoine.
[12] Crédit photographique : Raymond Balau.

**P. Simoens et J.-S. Pirnay - Le cinéma théâtre Varia à Jumet : quand le béton s'introduit dans le berceau de l'acier. 1917**
[1] Architecte Émile Claes.
[2] Photo auteur inconnu.
[3] (1910). *L'Émulation*, pl. XLVI. Photo Victor Rogister
[4] (1910). *Agenda et mémorandum du bâtiment*. Bruxelles : Bielevred
[5] (1892). *Aide-mémoire des Conducteurs des Ponts et Chaussés.* Ch. Beranger
[6] (1864). *Formules, Tables et renseignements usuels*. Paris : Dunod
[7] Xiao J., Li J., Zhu B., Fan Z. (2002). Experimental study on strength and ductility of carbonated concrete elements. *Construction and Building materials, 16 (3), 187-192*
[8] Crédit photographique : Architectes Cooparch

**J. Barlet - Le Forum à Liège. 1922**
[1] Barlet J., Joris F. (2008). Le Forum de Liège et l'œuvre de Jean Lejaer. *Carnets du Patrimoine*, 50, Institut du Patrimoine wallon.
[2] Crédit photographique : Groupe Triangle.
[3,4] Collection J. Barlet.
[5,6] Crédits photographiques : Guy Focant © SPW, DPat.

**E. Hennaut - L'église Saint-Aybert à Bléharies. 1926**
[1,3,4] Crédits photographiques : P. De Gobert
[2] *L'Artisan liturgique*, 3e année, n° 15, oct.-nov.-déc. 1929, p. 292.
[5] Hennaut E., Liesens L. (2008). *Henry Lacoste architecte*, Bruxelles : AAM.

**H. Claes et S. Mainil - Le Mémorial Interallié de Cointe : entre commémoration civile et religieuse. 1936-1937**
[1] Crédit photographique : Guy Focant, SPW-Patrimoine
[2] Courard, L., Gillard, A., Darimont, A., Bleus, J. M., & Paquet, P. (2012). Pathologies of concrete in Saint-Vincent Neo-Byzantine Church and Pauchot reinforced artificial stone. *Construction and Building Materials,* 34(0), 201-210.
[3] Smolderen J. (1935). Le Mémorial interallié de Cointe à Liège, dans *La technique des travaux. Revue mensuelle des procédés de construction moderne*, 11.
[4] (2005). *Liège-Monument interallié. Étude historique*. Régie des Bâtiments, SAI-Service de restauration.
[5] Wilmotte M. (1999). Liège. Le Mémorial interallié et l'église régionale du Sacré-Cœur-et-Notre-Dame-de-Lourdes, dans *Le patrimoine moderne et contemporain de Wallonie. De 1792 à 1958*, Warzée G. (dir.), Division du Patrimoine, DGATLP, Namur, 251-257.

**D. Dewolf - La *Boekentoren* de l'Université de Gand. 1936-2016**
[1] Page de couverture de *La Technique des Travaux*, mai-juin 1948, n°5-6.
[2] Bureau Greisch

# 3. LE BÉTON PRÉCONTRAINT, « UNE RÉVOLUTION DANS L'ART DE BÂTIR »

La précontrainte du béton consiste en l'introduction dans une structure d'un état de contraintes initial tel que, sous l'effet des sollicitations de service, celle-ci ne se fissure pas. La solution théorique à ce problème a été trouvée par l'ingénieur français Eugène Freyssinet en 1928 au terme d'une longue maturation de ses idées qui commence dès 1907. Dans l'isolement, il met au point les techniques fondamentales entre 1929 et 1934. En 1934, ses techniques sont utilisées pour reprendre en sous œuvre les fondations de la gare maritime du Havre, ce qui leur confère une notoriété éclatante. Suivent ensuite diverses applications de ses brevets en Algérie et en Allemagne. On lui doit encore, en 1939, le développement des outils de la précontrainte par post-tensioning. C'est vers cette époque que le Professeur Magnel de l'Université de Gand commence à s'intéresser au béton précontraint. En 1942-1943, il met au point, en collaboration avec l'entreprise bruxelloise Blaton-Aubert, un outillage spécifique de précontrainte qui connaîtra en Belgique une large utilisation pendant une vingtaine d'années à partir de 1944. Magnel est très rapidement reconnu au niveau international par la qualité pratique et pédagogique de ses publications découlant d'une recherche originale en laboratoire et de son rôle de conseiller pour de nombreux projets. D'abord utilisée pour (re)construire des ponts, la technique du béton précontraint trouve rapidement des applications dans le bâtiment. En Belgique, il s'agit probablement, aujourd'hui, de son principal débouché. On conseille au lecteur peu familiarisé avec la précontrainte la lecture préalable du troisième article de ce chapitre qui résume succinctement les principes, les définitions et la technologie du béton précontraint.

## L'INVENTION DU BÉTON PRÉCONTRAINT

**Bernard Espion**

### INTRODUCTION

Le principe même du fonctionnement des structures en béton armé telles que des poutres droites ou des dalles, implique que celles-ci sont fissurées en service sous l'effet des contraintes de traction induites par la flexion. Or, lorsque la portée de ces éléments augmente, on se trouve rapidement confronté à donner aux éléments des rapports hauteur/portée déraisonnables pour pouvoir contrôler la flèche. Ce n'est pas un hasard si les constructions en béton armé de grande portée jusqu'à l'avènement du béton précontraint dans les années 1930, sont des arcs ou des voûtes, formes constructives qui fonctionnent principalement en compression.

Dès les débuts du béton armé, à la fin du 19ème siècle, certains pionniers ont pris conscience des limitations imposées à la conception des structures par la faible résistance à la traction du matériau béton et ont cherché des moyens pour introduire dans les structures en béton un état permanent de contraintes de compression qui s'opposeraient aux contraintes de traction induites par les charges. Théoriquement, la façon la plus simple est d'imaginer des moyens pour mettre en tension les armatures préalablement au coulage du béton, de couler le béton sur les armatures sous tension, puis de relâcher l'effort de traction exercé sur les armatures. Grâce à l'adhérence acier-béton, les armatures qui veulent se raccourcir à ce moment en sont empêchées et mettent le béton en compression, elles-mêmes restant en traction. De nombreux brevets furent pris en ce sens [16], mais tous les efforts entrepris avant 1928 se soldent par des échecs, les inventeurs devant constater que la précontrainte du béton disparaît après quelque temps.

### MAÎTRISER LE RETRAIT ET LE FLUAGE DU BÉTON

Ces échecs s'expliquent par le fait que tous ces précurseurs utilisent comme armature de l'acier de résistance ordinaire, de limite élastique proche de 220 MPa, et méconnaissent les phénomènes de retrait et de fluage du béton qui conduisent à la perte d'efficacité à long terme de la précontrainte. Ce n'est qu'après avoir étudié l'amplitude de ces déformations différées du béton qu'il sera possible d'édicter les conditions qui permettent la conservation d'une précontrainte permanente du béton. Ce sera la longue quête de l'ingénieur français Eugène Freyssinet (1879-1962).
À sa sortie de l'École des Ponts et Chaussées,

Freyssinet est nommé en 1905 à Moulins (Allier). Dans les années qui suivent, il construisit pour l'Administration quantité de petits ponts en béton. Par un concours de circonstances qu'il a relaté [12, 13], il se trouve amené à construire lui-même trois ponts exceptionnels dont il a dressé le projet en 1907 : les ponts du Veurdre (Fig. 1), de Boutiron et de Châtel-de-Neuvre. Chaque pont est constitué de trois arches très surbaissées dont la plus grande ouverture atteint 72,5 m. Pour les décintrer, il compte appliquer une technique originale qui consiste à disposer, à la clé, des vérins hydrauliques qui prennent appui sur les extrémités des deux demi-voûtes. En exerçant une force suffisante entre ces extrémités au moyen des vérins, les voûtes se décollent du cintre. On peut alors caler la distance entre extrémités des voûtes à la clé, récupérer les vérins et ripper ou démonter les cintres. Pour tester la faisabilité de cette technique de décintrage innovante, il réalise à Moulins en 1908 un arc d'essai de 50 m d'ouverture et de 2 m de flèche. Il prévoit un tirant en béton de 150 $dm^2$ de section (3 m par 0,5 m) reliant ses appuis pour reprendre la poussée de l'arc. Afin d'empêcher la fissuration de ce tirant, ce qui entraînerait un allongement inacceptable, il a l'idée, révolutionnaire, de le comprimer par la mise en tension et l'ancrage (par paires) de 1200 fils de 10 mm de diamètre tendus à 250 MPa [11], exerçant ainsi sur le béton un effort d'environ 25 000 kN. Quoique les niveaux de tension dans l'armature soient fort bas, ce tirant est l'ancêtre de toutes les réalisations en béton précontraint : il utilise déjà le concept de précontrainte extérieure (les fils ne sont pas adhérents) et l'ancrage par clavettes (Fig. 2). On en avait perdu la trace, mais il a été retrouvé en 1993 [2]. Les essais de décintrement de l'arche d'essais s'étant avérés satisfaisants, Freyssinet peut alors passer à la réalisation des ponts.

Le Pont du Veurdre sera le premier des trois ponts à être réalisé (Fig. 1). Le coulage commence à l'été 1910. Les épreuves du pont furent un triomphe. Mais au fil de ses passages sur l'ouvrage, Freyssinet s'aperçut que la lisse des parapets, parfaitement droite à l'origine, s'incurvait insensiblement puis, de plus en plus visiblement. À la fin du printemps 1911, le niveau des clés s'était abaissé de 13 cm. Ceci était incompréhensible en fonction du règlement de 1906 qui attribuait une valeur constante au module d'élasticité du béton. Freyssinet a alors l'intuition des déformations différées du béton. Il ne voit comme autre moyen de sauver ses voûtes qui menacent ruine que de remettre les vérins en place à la clé (ce qui est heureusement possible), de relever les voûtes à leur position initiale, et de verrouiller l'articulation rendant ainsi les voûtes bi-articulées. Il réalise ceci sans avertir personne avec l'aide de quatre ouvriers. À partir de ce moment commence à naître dans l'esprit de Freyssinet l'idée que le vérin pourrait servir à régler les contraintes et les déformations, mais le chemin jusqu'à la précontrainte sera long.

En 1914, il quitte l'Administration pour s'associer avec un camarade de promotion, Claude Limousin, et devient en 1916 cogérant de la « Société Limousin et compagnie, procédés Freyssinet ». Entre 1914 et fin 1928, date à laquelle il quitte cette société, Freyssinet conçoit et réalise d'innombrables constructions en béton armé. Ce fut une période d'activité absorbante et particulièrement féconde au terme de laquelle il était non seulement devenu très riche [15] mais aussi passait pour un des plus grands maîtres, sinon le plus grand, de la construction en béton armé.

Figure 1 : Pont du Veurdre sur l'Allier[1]

Figure 2 : Arc d'essai avec son tirant précontraint[2]





## LE BREVET DE LA PRÉCONTRAINTE

Depuis le relèvement des arcs du pont du Veurdre, Freyssinet n'a jamais cessé de réfléchir à la question de l'introduction d'états de contraintes artificiels dans les constructions et en a même appliqués sur nombre de ses ouvrages[11]. Ce n'est cependant qu'à l'occasion de la construction du pont de Plougastel qu'il a pu reprendre l'étude du retrait et du fluage du béton. Il s'est livré de 1926 à 1928 - et il est l'un des tous premiers à le faire - à des essais de fluage.
Ayant compris, grâce à ces essais, les conditions qui permettent de maintenir de façon permanente un état de contraintes dans le béton préalablement à sa sollicitation par les charges de service, il dépose avec son ami Jean Séailles le 2 octobre 1928 un brevet relatif à « la fabrication de pièces en béton armé » (Fig. 3). En fait, il s'agit vraiment du brevet fondateur de la précontrainte. Il contient tous les éléments, toujours d'actualité, nécessaires à la fabrication de pièces en béton précontraintes par ce que nous appelons maintenant le pre-tensioning et en particulier que « pour tirer le maximum d'économie du procédé, il est indiqué d'utiliser des bétons à haute résistance à la compression et des aciers à haute résistance et à limite d'élasticité élevée. » Deux demandes d'addition suivent rapidement : l'une décrit plus particulièrement la précontrainte par post-tensioning ; l'autre apporte un perfectionnement aux dispositifs d'ancrage. Cependant, son associé Limousin ne veut pas le suivre sur la voie ouverte par la précontrainte. Fin 1928, Freyssinet résilie tous ses droits dans leur société commune pour se lancer, à 50 ans et sur ses propres deniers, dans l'aventure de la valorisation de son invention.

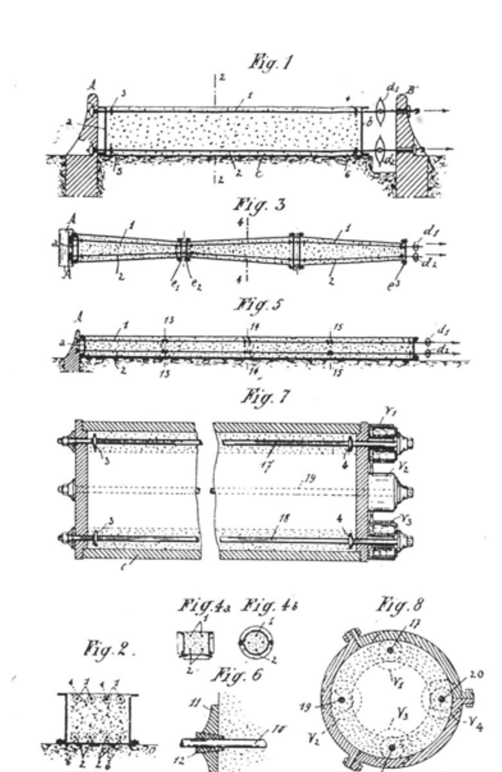



Figure 3 : Brevet (1928) de la précontrainte[3]

## PREMIÈRES APPLICATIONS EN FRANCE

Voilà donc Freyssinet, début 1929, à la recherche d'applications pour la précontrainte. La première opportunité qui va se présenter est celle de la fabrication de poteaux électriques pour la société Forclum, émanation des grands réseaux de la région parisienne. Il construisit à Montargis une usine pilote pour la fabrication de poteaux creux de dimensions comprises entre 12 et 16 m. Il fallait tout inventer et tout mettre au point. La société Forclum mit à sa disposition à Besons une ancienne centrale qu'il transforma en laboratoire pour la mise au point des techniques nécessaires à la fabrication. L'optimisation de la composition des bétons, de leur condition de mise en œuvre et de cure permettait de transférer la précontrainte sur les poteaux une heure après bétonnage alors que la résistance du béton atteignait déjà 50 MPa (et 100 MPa après quelques jours)[13]. Au début 1933, la chaîne de fabrication pouvait produire journellement avec dix hommes 50 poteaux de 16 m de longueur (Fig. 4). Ces années 1929-1933 furent déterminantes pour la mise au point des procédés, mais se soldèrent par un échec commercial cuisant car il n'existait pas de marché pour ces poteaux en 1933. Freyssinet était au bord de la ruine.

Figure 4 : Poteaux précontraints Forclum[4]

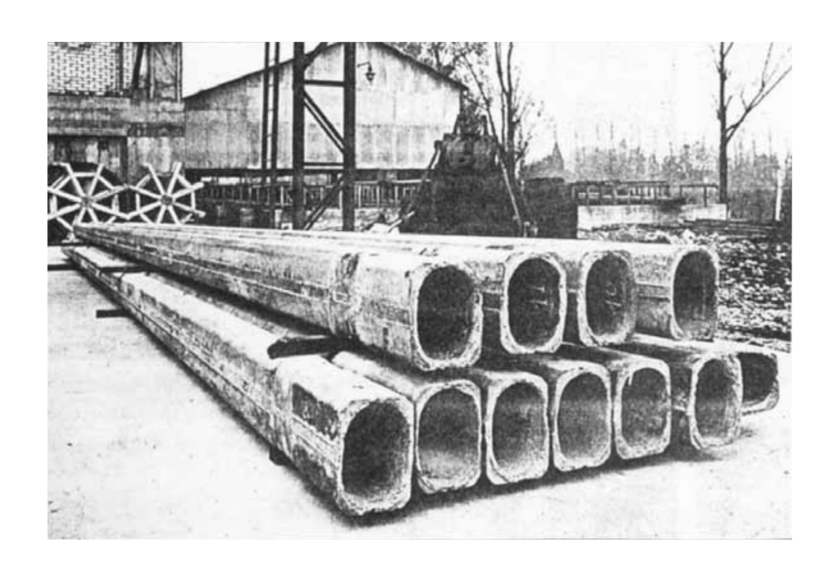




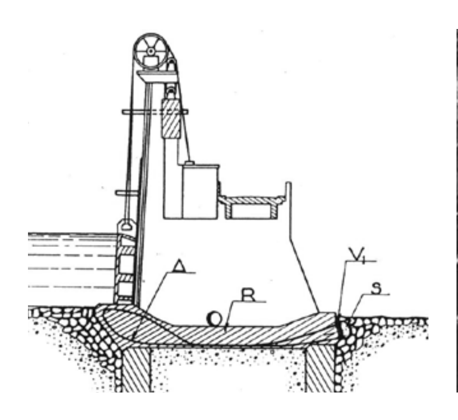
Figure 5 : Précontrainte des semelles de fondation à la gare maritime du Havre (1934)[5,6]

Mais une opportunité exceptionnelle d'utiliser les techniques de la précontrainte mises au point à Montargis va se présenter à lui. Au printemps 1933 on achevait le gros œuvre de la construction de la gare maritime du Havre. Bâtiment important (600 m de longueur, 55 m de largeur) et prestigieux s'il en fut puisqu'il devait servir pour l'embarquement et le débarquement des passagers du paquebot « Normandie ». Or, l'étude de ses fondations n'avait pas reçu l'attention requise car les pieux étaient fondés sur des couches superficielles de capacité insuffisante. Vers l'achèvement du gros œuvre, on s'aperçut très vite de l'apparition de tassements différentiels des fondations du bâtiment. En 1934, certains pieux avaient tassé de plus de 30 cm ! La construction menaçait ruine. Il devenait indispensable d'arrêter ces mouvements dans un court délai. Pour cela, un seul moyen : reporter sur les couches solides profondes les charges du bâtiment, de ses anciennes fondations, les surcharges éventuelles et une fraction suffisante du poids des remblais (150 000 tonnes) par fonçage de pieux de 30 m de longueur. Freyssinet proposa une reprise en sous-œuvre des fondations capitalisant sur les principes de la précontrainte par post-tensioning pour la réalisation de semelles (Fig. 5) et sur ses techniques de durcissement accéléré des bétons pour le fonçage de nouveaux pieux au travers des semelles. Sa proposition fut acceptée car elle constituait l'unique chance d'éviter une catastrophe pour le prestige français. Sa mise en œuvre nécessita le fonçage de 712 pieux de 200 à 250 tonnes de capacité et permis l'inauguration à temps de la gare maritime du Havre à l'occasion du premier voyage du paquebot « Normandie » le 23 mai 1935.

## EXPÉRIMENTATIONS À GRANDE ÉCHELLE EN ALGÉRIE

D'éminents visiteurs vinrent voir les travaux de sauvetage de la gare maritime du Havre. Parmi eux Edme Campenon, PDG de l'entreprise de construction Campenon Bernard. Tout de suite, celui-ci croit en la précontrainte et il propose à Freyssinet un contrat de collaboration exclusive. Campenon Bernard, occupé à de grands chantiers de travaux publics en Algérie, n'hésite pas à proposer la mise en œuvre à grande échelle de solutions précontraintes.

Ce seront, de 1935 à 1939, les réalisations d'Oued Fodda, qui donnent à Freyssinet l'occasion de mettre au point plusieurs techniques de précontrainte. À cette époque (1935), il invente le vérin plat dont le principe est celui du sac que l'on gonfle par un fluide sous pression. Il l'utilise pour la première fois pour précontraindre le radier du barrage des Portes de Fer en 1936 (Fig. 6). Mais ce n'est pas la seule application de la précontrainte : les vannes levantes, c'est-à-dire les portes du barrage, de 19 m de longueur, sont, elles même, précontraintes par fils adhérents. De plus, les



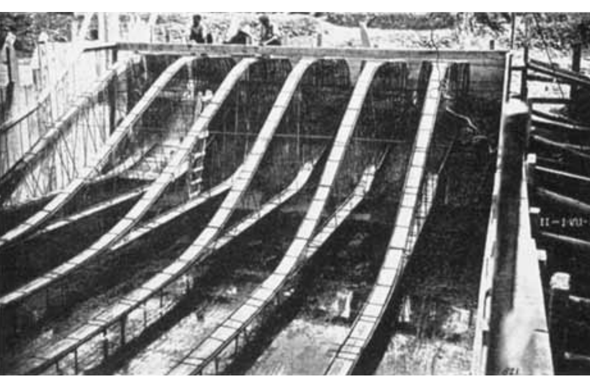



Figure 6 : Précontrainte du radier du barrage des Portes de fer (Algérie)[7]

contreforts du barrage supportent le tablier d'un pont de service réalisé (1937-1939) avec des poutres précontraintes à fils adhérents de 20 m de portée.

Pour la distribution d'eau d'Oued Fodda, Freyssinet conçu les premiers tuyaux précontraints longitudinalement et transversalement au moyen de fils adhérents. Ces tuyaux avaient des diamètres de 1 m, 1,2 m ou 1,4 m. Campenon Bernard installa en Algérie une usine de préfabrication qui produisit les éléments pour réaliser 57 km de conduites d'eau.

Enfin, on notera encore antérieurement (1933-1935) une application peu connue de précontrainte pour la consolidation du barrage des Cheurfas, réalisée par la mise en tension de 37 tirants d'ancrage traversant verticalement l'ouvrage et scellés dans le sol [9]. Chaque tirant était constitué de 630 fils de 5 mm tendus à 800 MPa. Cette solution, à laquelle Freyssinet n'est en rien associé, avait été proposée par André Coyne (1891-1960) en 1929[8].

## DE L'AUTRE CÔTÉ DU RHIN

Dès 1930, les idées de Freyssinet avaient intéressé l'entreprise allemande Wayss & Freytag, d'illustre mémoire dans l'histoire des débuts du béton armé. En 1933, elle construisit à Francfort sur les plans de Freyssinet une poutre expérimentale en béton précontraint de 20 m de portée, en fait une maquette à l'échelle 1/3 d'une poutre de 60 m de portée. Il s'agit d'une poutre précontrainte par pretensioning dont l'âme est aussi précontrainte verticalement. L'armature est constituée de fils de 5 mm tendus à 550 MPa en prenant réaction sur le moule. La résistance du béton atteignait 20 MPa à 6 heures et 39 MPa à 28 jours. La poutre a subi de nombreux essais de mise en charge à court terme, puis laissée chargée pendant 18 mois à 60 % de sa charge de service (Fig. 7). La charge de rupture mesurée fut de 2,3 fois le poids propre plus la charge de service. Une deuxième poutre expérimentale similaire fut construite et testée à Dresde en 1936. Ces poutres expérimentales sont en fait des prototypes en vraie grandeur des poutres du barrage des Portes de Fer en Algérie. L'entreprise Wayss & Freytag construisit le premier pont avec tablier réalisé au moyen de poutres précontraintes de ce type à Oelde (Rhénanie du Nord - Westphalie) en 1938. Leur portée est de 32 m ; Freyssinet en conçu le plan en février 1938.

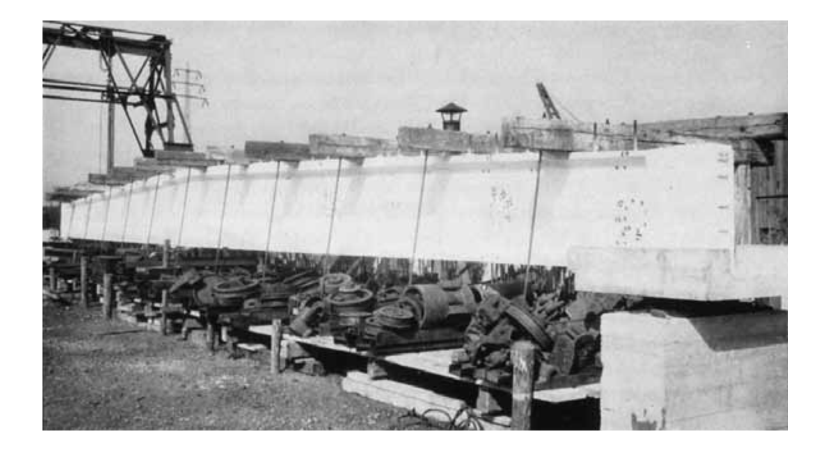


Figure 7 : Essai d'une poutre précontrainte à Francfort (1933-1934)[6]

L'entreprise de construction concurrente de Wayss & Freytag sur le marché allemand, Dyckerhoff & Widmann, dont le bureau d'études était dirigé par Franz Dischinger (1887-1953) va également contribuer aux développements des techniques du béton précontraint, mais en suivant une voie différente : celle de la précontrainte extérieure au béton réalisée au moyen de barres de gros diamètre en acier de nuance St52 (limite élastique à 355 MPa), avec extrémités filetées et dont les ancrages devaient permettre une remise en tension ultérieure pour compenser les pertes de précontrainte dues au fluage et au retrait. Une application de ce principe est faite pour construire un pont cantilever en caisson à trois travées à Aue (Saxe) en 1937 [18]. La nécessité de retendre les armatures s'avéra être une mauvaise idée en pratique, mais le chemin était tracé pour l'application après la guerre de la précontrainte externe par barres de fort diamètre, mais de résistance beaucoup plus élevée.

## NAISSANCE DE LA POST-TENSION

Avant la guerre, on note encore comme applications notoires de la précontrainte par Freyssinet et Campenon Bernard les travaux aux fondations du barrage à contreforts des Béni-Bahdel en Algérie en 1939, et les caissons d'un quai de 1200 m à Brest. Ce sont des applications de la technique des vérins plats.

Jusqu'en 1939, tous les ouvrages et éléments construits par Freyssinet en utilisant le principe de la précontrainte étaient basés sur des solutions originales, réponses spécifiques à chaque nouveau problème. Mais Freyssinet était conscient que les procédés qu'il avait inventés et mis au point à Montargis, au Havre ou dans les grands ouvrages d'Oued Fodda étaient trop complexes pour résoudre



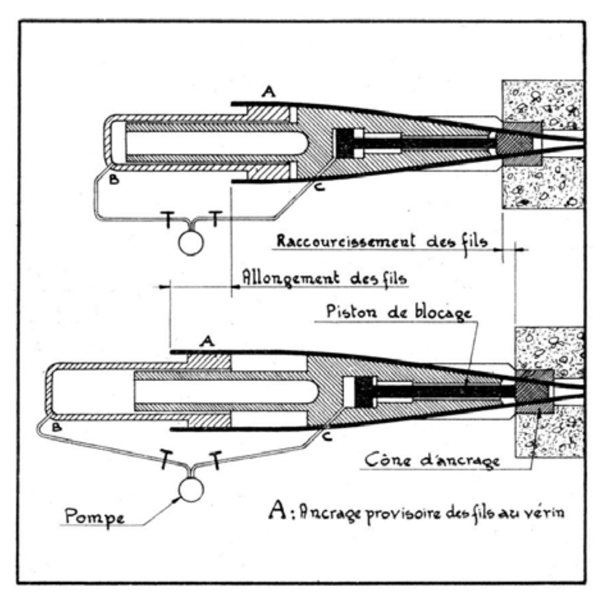



Figure 8 : Ancrage à cône et son vérin de mise en tension à double effet[1]

les problèmes de ponts. C'est pour cette raison qu'en 1939, il invente l'ancrage à cône dont le principe est l'ancrage des fils par frottement entre un cône mâle simplement en mortier et un cône femelle en béton fretté (Fig. 8). Ces ancrages étaient commodes, adaptables (modèles pour ancrer six à douze fils ou douze à dix-huit fils de 5 mm) et peu coûteux. Ils vont être employés pendant près de 20 ans. Lors d'une célèbre conférence donnée à Paris en novembre 1941[7], il expose le principe du vérin à double effet de mise en tension simultanée et de blocage de tous les fils d'un câble (Fig. 8). Grâce aux ancrages et aux vérins de mise en tension adaptés, il devenait possible de réaliser sans difficulté toute forme de précontrainte concevable, en ligne droite ou courbe, en une seule fois, ou en contraignant partiellement par étapes successives, avec l'ensemble de toutes les armatures ou indépendamment pour chaque câble ou fil. La précontrainte par post-tensioning était véritablement née, mais l'éclatement de la Seconde Guerre mondiale allait en retarder son application. Le premier ouvrage réalisé à l'aide de cette technique est le pont de Luzancy sur la Marne, dont le projet date de 1939, le début de la réalisation en 1940 et l'achèvement en 1946.

## CONTRIBUTIONS DE GUSTAVE MAGNEL AU DÉVELOPPEMENT DU BÉTON PRÉCONTRAINT

**Luc Taerwe**

### LA PÉRIODE « BÉTON ARMÉ »

Gustave Magnel (Fig. 1) est né en 1889 et est diplômé ingénieur civil de l'Université de Gand en 1912. De 1914 à 1919, il est employé par un entrepreneur de travaux de Londres et, en 1919, commence sa carrière à l'Université de Gand. Grâce à son séjour à Londres, il maîtrisait non seulement le français et le néerlandais, mais également très bien l'anglais, ce qui s'avérera fort utile par la suite pour ses relations en Amérique du Nord. À cette époque, le français était la langue principalement utilisée par les ingénieurs en Belgique, ainsi qu'une des langues de travail pour les contacts internationaux en Europe.



Figure 1 : Le Professeur Gustave Magnel (1889-1955)[1]

En 1923, il publie son premier livre « Pratique du calcul du béton armé » consacré au dimensionnement du béton armé. La même année, l'Institut Belge de Normalisation (IBS) publie ses premières recommandations concernant le béton armé et Magnel en est le principal auteur. L'un des tout premiers articles techniques de Magnel est consacré à l'influence de la rigidité des colonnes sur la distribution des efforts dans les poutres continues en béton armé.

Pour Magnel, il devient clair que le développement futur du béton armé doit s'accompagner de recherches et donc qu'il doit s'équiper d'un laboratoire. Après avoir surmonté de nombreuses difficultés d'ordre politique ou financier, il réussit à créer le « Laboratoire de Béton Armé » en 1926, dont la première localisation se trouve dans les caves d'un ancien hôtel. Dans ce laboratoire, Magnel

dispose d'une machine universelle d'essais de 300 kN et d'une presse de compression de 3 000 kN. Voici ce qu'écrit Magnel à propos des efforts qu'il a dû mettre en œuvre pour créer son laboratoire et le maintenir en fonctionnement : « L'évolution ultra rapide de la technique oblige les établissements universitaires de s'adapter aux exigences du moment sous peine de faillir à leur tâche. Cette adaptation - quand il s'agit d'universités de l'État - ne saurait se faire par l'initiative de l'administration qui est, par définition, incompétente et qui, d'autre part, cherche des économies plutôt que des dépenses nouvelles. C'est donc aux professeurs qu'il incombe de faire l'impossible pour tenir leur enseignement et leur centre de recherches à la hauteur de la science technique du moment ». Et d'ajouter : « Il ne suffit pas d'équiper un laboratoire : la question est de le maintenir opérationnel, ce qui nécessite un financement additionnel. Nous obtenons des revenus supplémentaires en exécutant des essais pour des entrepreneurs, pour des sociétés ou des administrations publiques... ».

En 1937, le laboratoire est déplacé dans un tout nouveau bâtiment de la Faculté des Sciences Appliquées, où il dispose d'un espace plus vaste et où de nouvelles machines d'essais sont installées. En 1940, ce laboratoire constitue le centre d'essais et de recherches sur le béton armé le plus avancé et le plus sophistiqué au monde. Magnel n'avait que peu d'intérêt pour les essais sur modèles de petites dimensions et, en 1950, le laboratoire est équipé d'une dalle d'essais permettant la mise en charge d'éléments de structure en béton armé et précontraint en vraie grandeur. En 1975, le laboratoire déménage sur un nouveau campus dans la banlieue de Gand (à Zwijnaarde) où il se trouve toujours. Dans les années 1990, le laboratoire est rebaptisé « Laboratoire Magnel pour la recherche sur le béton » pour souligner que la recherche qui y est effectuée est consacrée tant au niveau matériau qu'au niveau structure.

## CONTRIBUTIONS PRÉCOCES AU DÉVELOPPEMENT DU BÉTON PRÉCONTRAINT

La première mention par Magnel du béton précontraint par pre- et post-tensioning date de 1940. Ces techniques étaient alors déjà utilisées à l'étranger et Magnel tente de convaincre des sociétés Belges d'appliquer ces procédés.

Magnel fut interdit d'enseignement par l'occupant durant la Seconde Guerre mondiale. Cependant, les Allemands l'autorisèrent à continuer à diriger le laboratoire qu'il avait créé. Durant ces années de réclusion dans son laboratoire, Magnel eu l'opportunité d'effectuer une recherche de grande envergure sur des poutres en béton précontraint. Il étudia également le fluage des fils en acier à haute résistance ainsi que le retrait et le fluage du béton. Durant les années de guerre, il était impossible pour lui d'obtenir le système de précontrainte développé par Freyssinet en France. En conséquence, il développa lui-même un système de post-tensioning baptisé « Belge » connu plus tard sous le nom système « Blaton-Magnel » (Fig. 2). L'ancrage de ce système est constitué de plusieurs plaques « sandwich » superposées parallèlement l'une sur l'autre et prenant appui sur une plaque d'about en acier coulé. Chaque élément sandwich présente quatre rainures qui permettent la fixation de huit fils par paires au moyen de quatre clavettes en forme de coin plat. De cette façon, la tension des fils (typiquement de diamètre 5 mm) d'un câble est plus uniforme que si tous les fils avaient été tendus simultanément. De plus, la mise en tension des fils par ce système ne nécessite qu'un vérin de capacité modérée (Fig. 3). Le câble est disposé dans une gaine métallique, ou des trous réservés dans le béton pour y permettre le passage du câble dans la poutre après durcissement du béton. Sur toute la longueur du câble, des écarteurs verticaux et horizontaux sont disposés à intervalle régulier pour s'assurer que la position relative des fils reste constante le long du tracé du câble. Grâce

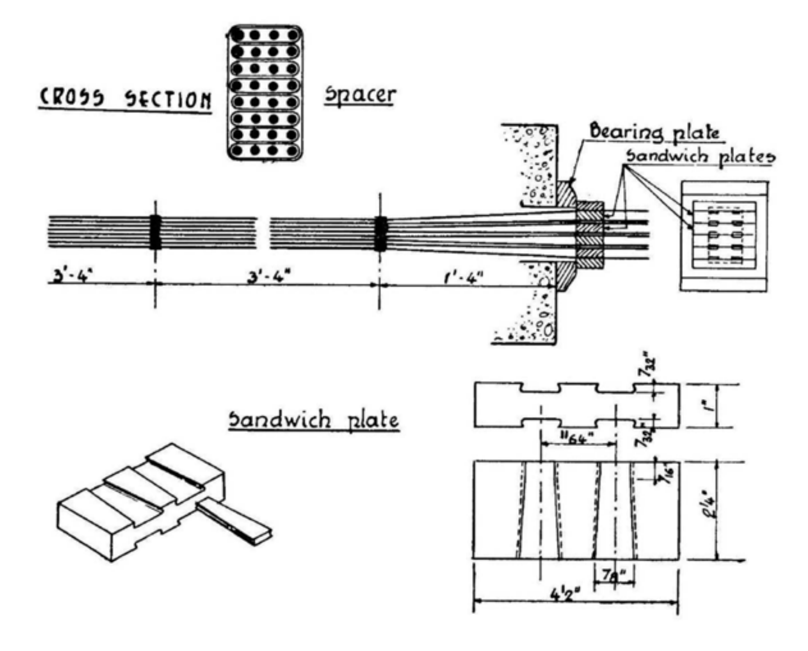



Figure 2 : Ancrage du système Blaton-Magnel[1]

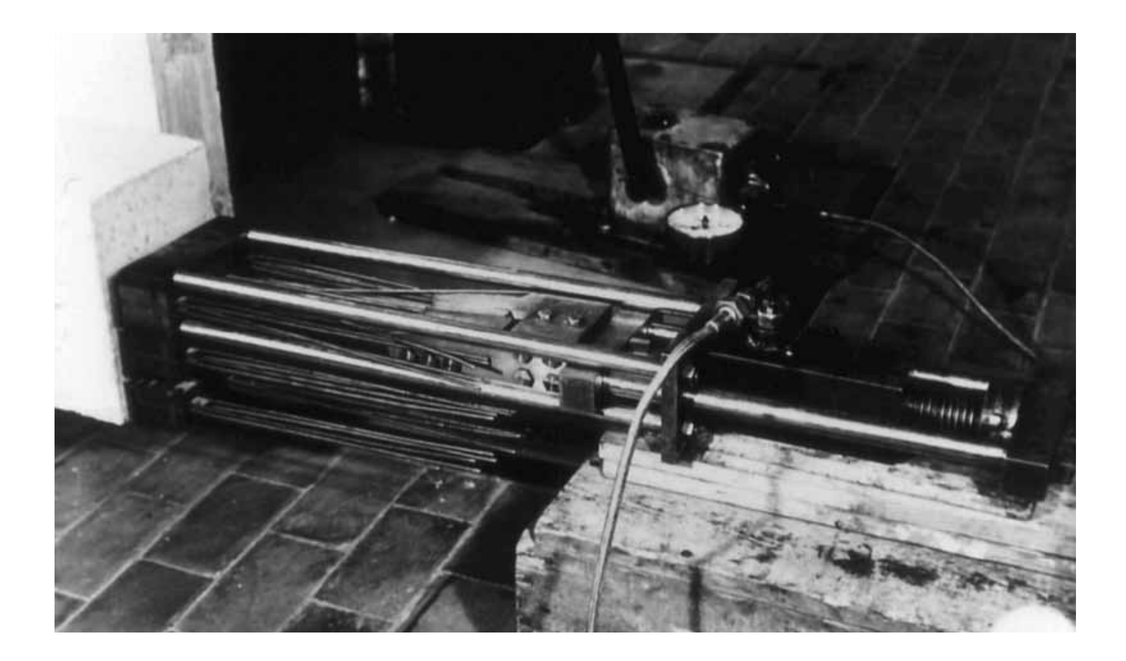


Figure 3 : Vérin utilisé avec le système Blaton-Magnel[1]

à ce détail qui garantissait un espace libre de géométrie régulière autour de chaque fil, il était possible d'effectuer une injection au ciment de bonne qualité, condition essentielle d'une bonne protection des fils contre la corrosion.

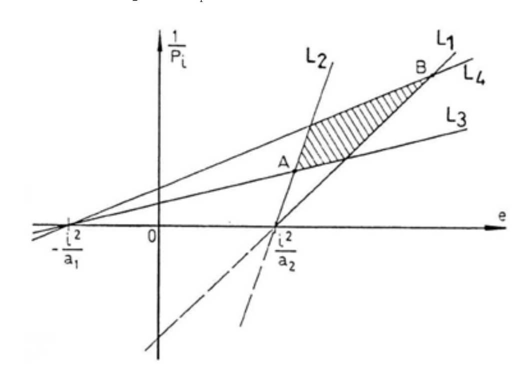
En 1946, Magnel publie sa méthode de dimensionnement des poutres isostatiques. Il énonce les quatre conditions suivantes à satisfaire sous charge de service relativement à la distribution de contraintes dans le béton dans la section critique :

- limitation à une valeur admissible de la contrainte de traction à la fibre supérieure à la précontrainte sous poids propre ;
- limitation à une valeur admissible de la contrainte de compression à la fibre supérieure en précontrainte et sous pleine charge de service ;
- limitation à une valeur admissible de la contrainte de compression à la fibre inférieure à la précontrainte et sous poids propre ;
- limitation à une valeur admissible de la contrainte de traction à la fibre inférieure en précontrainte et sous pleine charge de service.

Ces conditions d'inégalité sont représentées par quatre droites dans un diagramme d'axes $1/P_i$ (avec $P_i$ : valeur initiale de l'effort de précontrainte) et e (excentricité) qui délimitent un quadrilatère à l'intérieur duquel tous les couples de valeurs ($1/P_i$,e) sont admissibles (Fig. 4). En principe, l'excentricité qui conduit à la plus petite valeur de $P_i$ est choisie.
En ce qui concerne l'effort tranchant, il tient compte de l'effet favorable de la précontrainte sur la valeur de l'effort tranchant agissant sur les sections de béton. Il recherche ensuite la section et la fibre où apparaît la plus grande contrainte principale de traction et la compare avec une valeur admissible.

Pour le dimensionnement des abouts des poutres, il propose de calculer l'effort tranchant et le moment fléchissant agissant sur des sections horizontales, ce qui constitue l'approche actuellement connue sous le nom d'analogie de la poutre courte. Les contraintes tangentielles et normales résultantes sont combinées avec des composantes de contrainte venant d'autres contributions pour calculer la plus grande contrainte principale de traction.

Figure 4 : Quadrilatère de solutions admissibles pour $1/P_i$ et e[1]



En 1951, Magnel écrit : *"In my opinion, for each beam two calculations have to be made: the first based on stresses using the elastic theory, the other on ultimate load. However, it seems to be impossible at present to make this latter calculation accurately because all known methods require the use of coefficients, the value of which we really ignore. This is mainly true when the failure occurs by crushing of the concrete. I recommend the design based on stresses as the fundamental one, but as it does not always give the same factor of safety against ultimate failure, an attempt must be made in each case to check whether this factor of safety is sufficiently high."*

En 1946 déjà, il essaye une poutre partiellement précontrainte pour laquelle la charge de fissuration est plus faible que la charge de service, et ce en contradiction avec le principe original de la précontrainte « totale » qui n'admettait pas l'apparition de contraintes de traction dans le béton en service. Quoique Freyssinet s'opposât vivement à l'usage de la précontrainte partielle, Magnel réalisa que celle-ci pouvait offrir quelques avantages.

En 1947, il élabore une solution pratique pour le cas des poutres continues précontraintes par post-tensioning. Il introduit le concept des moments secondaires (« parasitaires » selon la terminologie de Magnel) $M_{P,sec}$ induits par la force de précontrainte P et défini l'excentricité équivalente comme :

$$e_{eq} = e + M_{P,sec} / P \quad (1)$$

De cette façon il peut utiliser un diagramme $1/P_i$ - $e_{eq}$ similaire à celui pour les poutres isostatiques. Les relations entre les vraies excentricités et les excentricités équivalentes sont calculées en fonction des expressions des moments secondaires.

Ayant accumulé suffisamment de connaissances théoriques et d'expérience pratique à propos du béton précontraint, il rédige son premier livre sur le sujet. Il est d'abord publié en français en 1948, mais est très rapidement traduit en anglais et en espagnol.

## PREMIERS PROJETS EN BELGIQUE

Pour le pont-rail de la Rue du Miroir de la jonction Nord-Midi à Bruxelles, deux des six tabliers furent réalisés (1943-1944) en béton précontraint (Fig. 5). Pour une portée de 20 m, une hauteur totale de ces tabliers de 1,15 m s'avéra suffisante alors qu'un tablier en béton armé nécessitait une hauteur de 1,75 m. La construction de ce pont fut considérée comme un projet-pilote et le programme expérimental l'accompagnant fut financé, partiellement, par le Fonds National de la Recherche Scientifique. Dès lors, la Belgique était l'un des premiers pays à se voir doter d'un pont-rail en béton précontraint. À propos de ce projet, Magnel conclut : « À notre avis, le béton précontraint est le matériau de l'avenir. Dans dix ans, on ne construira plus beaucoup de ponts en béton armé ordinaire, tellement on sera pénétré des avantages de la précontrainte. L'entreprise des ponts expérimentaux de la Rue du Miroir aura été le catalyseur de cette évolution et tous ceux qui y ont collaboré peuvent justement être fiers du résultat obtenu. »

Les premiers ponts-routes en Belgique ont été construits à Zammel (début des travaux en 1944 ; 12 m de portée) et à Eeklo (1945-1946 ; 20 m de portée).
En 1947-1948, une nouvelle usine textile est construite à Gand pour l'Union Cotonnière (UCO). Elle va se voir dotée de la plus grande couverture au monde (35 000m²) en béton précontraint ; elle existe toujours en l'état (Fig. 6). Il fut nécessaire de réaliser plus de

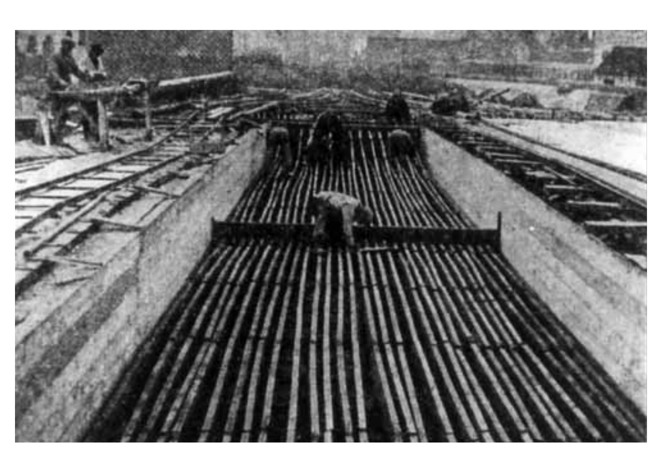


Figure 5 : Pont-rail au-dessus de la rue du Miroir à Bruxelles (1943-1944)[1]



Figure 6 : Usine textile avec poutres de toiture précontraintes par post-tensioning (1947-1948)[1]

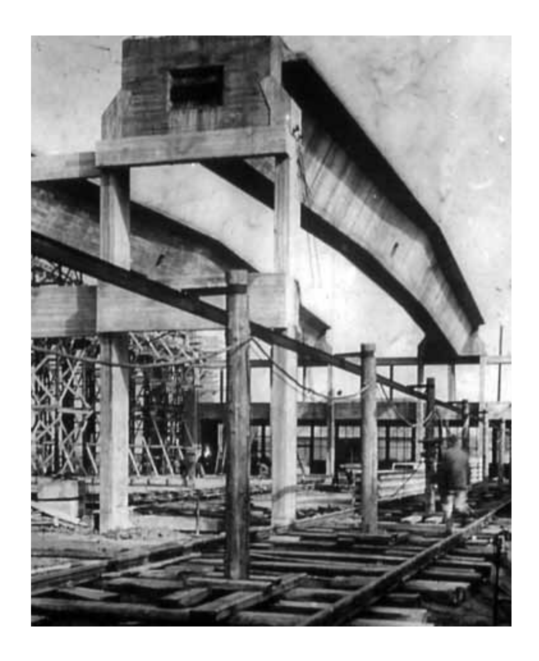


Figure 7 : Poutres pour toiture de hangar à l'aéroport de Melsbroek[1]

100 poutres principales de 20,5 m de portée et 600 poutres secondaires de 13,7 m. Toutes ces poutres ont été préfabriquées sur chantier au rythme de trois poutres principales et dix-huit poutres secondaires par semaine, ce qui nécessita une parfaite organisation du chantier de préfabrication. Magnel écrit à propos de cette réalisation remarquable : « Durant les 3 ou 4 derniers mois, ce projet attire de nombreux architectes, ingénieurs et entrepreneurs belges ou étrangers. Ils veulent s'instruire dans le domaine du béton précontraint, tout d'abord dans notre laboratoire et ensuite sur chantier. »

De la même époque date la construction d'un hangar pour avions à Melsbroek, l'ancien aéroport de Bruxelles. La toiture est supportée par dix-sept poutres précontraintes par post-tensioning de 52 m de portée et pesant plus de 300 tonnes chacune (Fig. 7). Comme dans le projet UCO, ces poutres ont été coulées au niveau du sol, précontraintes, puis mises en place par levage au moyen de vérins.
1949 est l'année de construction du fameux pont de Sclayn sur la Meuse (Fig. 8). Il s'agit du premier pont au monde à poutre continue en béton précontraint (Fig. 9 et 10). Avec deux travées de 63 m de longueur chacune, il s'agit également, à l'époque, du plus long pont en béton précontraint au monde.

Grâce à l'inertie variable de la section de la poutre, le tracé des câbles est quasi rectiligne d'un bout à l'autre, avec une très faible discontinuité angulaire au niveau de la section au droit de l'appui central. Dans cette section, le moment secondaire induit par la précontrainte équivaut à 68 % du moment dû au poids propre.

## LE PONT DE LA *WALNUT LANE* À PHILADELPHIE

En 1946, Magnel effectue son premier voyage aux États-Unis grâce à la Belgian-American Educational Foundation fondée par Herbert Hoover en 1920. Son voyage a été organisé par Charles C. Zollman, ancien étudiant de Magnel à l'Université de Gand. Un peu plus tard, il devient le représentant officieux de Magnel aux États-Unis, responsable des détails pratiques de plusieurs voyages de Magnel vers ce continent. Les interventions précoces de Zollman dans la conception et la construction d'usines de préfabrication en divers endroits des États-Unis, ses activités dans le domaine de la préfabrication, de même que

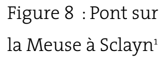


Figure 8 : Pont sur la Meuse à Sclayn[1]



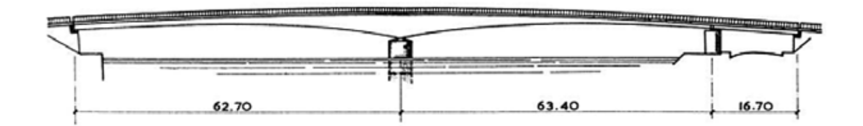



Figure 9 : Élévation du pont de Sclayn[1]

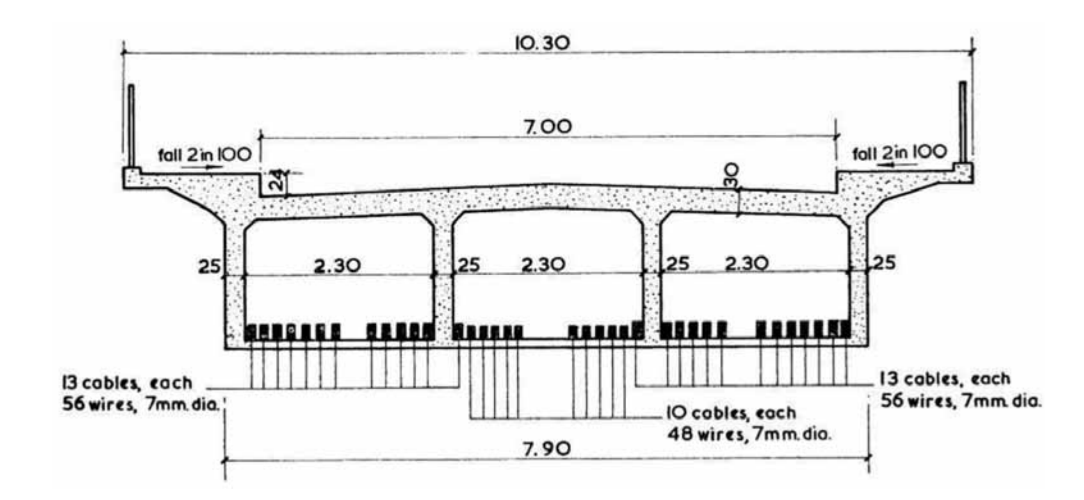



Figure 10 : Section transversale du tablier du pont de Sclayn[1]

ses nombreuses contributions au *Prestressed Concrete Institute* font de Zollman un des pionniers de la préfabrication aux États-Unis. Durant sa visite aux États-Unis, Magnel donna des conférences sur le béton précontraint en plusieurs endroits, alors que ce sujet était alors quasi inconnu dans ce pays. Magnel avait le don unique d'expliquer des théories complexes et des problèmes ardus d'une façon très simple et parvenait ainsi à captiver de grands auditoires.

Deux événements importants se produisent durant le séjour de Magnel aux États-Unis, et ils auront une influence directe sur le développement initial du béton précontraint en Amérique, qui culmine avec la réalisation du pont de la *Walnut Lane* à Philadelphie, le tout premier pont en béton précontraint aux États-Unis (Fig. 11). Le premier évènement est la rencontre de Magnel avec la Preload Corporation de New York, société qui deviendra sous-traitante pour la construction du pont de la *Walnut Lane*. Le second est la demande adressée par Magnel à Zollman pour que ce dernier traduise en anglais le manuscrit français de son livre sur le béton précontraint. Après beaucoup d'efforts et de difficultés, le livre est publié à Londres en 1948. Le premier tirage à 6 000 exemplaires est rapidement épuisé. La seconde édition, revue et augmentée, tirée à 8 000 exemplaires, est publiée en 1950. La 3$^{ème}$ édition est publiée en 1954. À cette époque, le livre de Magnel est l'outil pratique que tous les étudiants et tous les ingénieurs praticiens utilisent pour le dimensionnement et l'analyse des constructions en béton précontraint. L'impact qu'ont eu sur l'industrie du béton précontraint les diverses éditions de ce traité, ainsi que d'autres publications de Magnel, est très significatif. Au début des années, 1950, l'ingénieur sino-américain T.Y. Lin passe une année complète dans le laboratoire de Magnel et publie à son retour aux États-Unis son livre *Design of Prestressed Concrete Structures* (1955) appelé à devenir l'une des références classiques de la littérature sur le béton précontraint.

À la fin des années 1940, C. Zollman, qui a alors rejoint la Preload Corporation, parvient à convaincre le département des travaux de la ville de Philadelphie de réaliser la superstructure du pont de la *Walnut Lane* en béton

Figure 11 : Pont de la *Walnut Lane* à Philadelphie[1]





Figure 12 : Essai de chargement d'une poutre du Pont de la *Walnut Lane*[1]

précontraint sur base d'un projet élaboré par Magnel. La Preload Corporation est déclarée adjudicataire pour la réalisation des poutres du pont en 1949. En octobre 1949 est organisé un essai en vraie grandeur de mise en charge d'une poutre de 49 m de portée et 2 m de hauteur, identique aux poutres qui seront mises en œuvre pour réaliser la travée centrale du pont (Fig. 12). Cet essai est réalisé en présence de quelques 300 ingénieurs venus de dix-sept états et de cinq pays qui passent la journée sous la pluie pour assister à cet événement. La réussite de cet essai à rupture réalisé sur le site du chantier, loin du confort d'un laboratoire, représentait un succès remarquable qui contribua à inspirer la confiance publique vis-à-vis du béton précontraint. C. Zollman formula cela de la façon suivante : "*No single event was more instrumental in launching the prestressed and precast concrete industry in North-America than the construction of the Walnut Lane Bridge in Philadelphia in 1950. More than anything else however, it was the charisma, the dynamism and engineering talent displayed by the man who designed the Walnut Lane Bridge, namely Prof. Gustave Magnel of Belgium, that gave the impetus necessary for the acceptance and development of prestressed concrete in the United States.*"

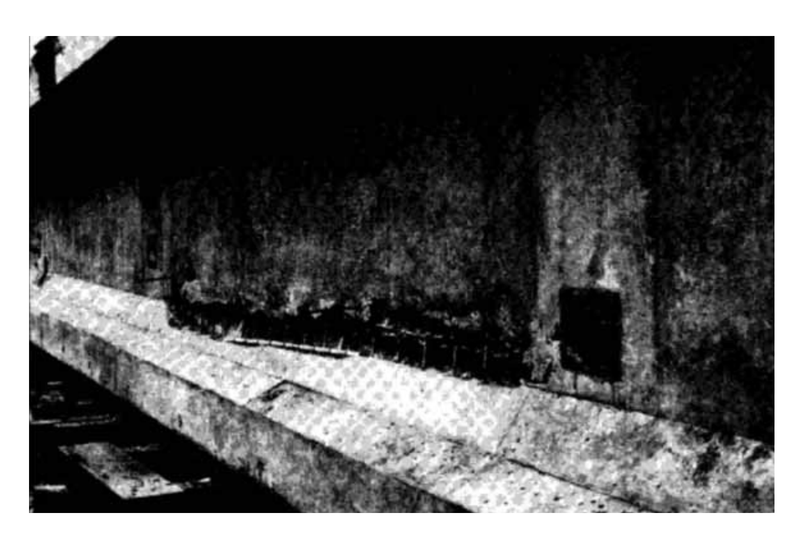
Figure 13 : Nids de gravier sur la 1ère poutre coulée en 1949[1]

Avant et pendant la construction du pont, il fallut cependant résoudre certains problèmes car Magnel avait spécifié un béton avec "zero slump". Suivant la pratique américaine, ceci n'était guère possible, mais Magnel devait approuver tous les détails d'exécution. Finalement, une solution pratique fut trouvée, mais plusieurs poutres présentaient des nids de gravier ou d'autres imperfections (Fig. 13 et Fig. 14). La controverse alla suffisamment loin pour trouver un écho dans l'influent périodique « Engineering News Record » qui titra : *"Americans make soup, not concrete, says Belgian professor"*.

En octobre 1950, le Franklin Institute de Philadelphie décerne au professeur Magnel sa prestigieuse médaille Frank P. Brown pour ses contributions exceptionnelles au développement du béton précontraint.

Le *Walnut Lane Memorial Bridge* fut affecté de quelques problèmes qui limitèrent sa durabilité: certaines poutres durent subir des réparations majeures et il fut finalement décidé de remplacer toute la superstructure. L'installation du chantier en vue de l'évacuation des poutres d'origine débuta en 1989. La reconstruction du pont en 1990 et la rectification de ses approches suscitèrent presque autant d'intérêt et de curiosité dans le milieu des ingénieurs et de la construction que l'avait fait la structure originale 40 ans plus tôt. Les nouvelles poutres, de conception basée sur

Figure 14 : Fissuration longitudinale à la semelle inférieure d'une des poutres[1]





une adaptation hybride de la poutre standard AASHTO Type V, furent toutes préfabriquées dans une usine certifiée PCI, alors qu'en 1949, les poutres avaient été fabriquées et précontraintes par post-tensioning sur le chantier.

## L'APRÈS *WALNUT LANE*

Au début des années 1950, plusieurs chercheurs américains qui deviendront célèbres, ont séjourné dans le laboratoire de Magnel, parmi eux T.Y. Lin (Berkeley), David P. Billington (Princeton University) et Robert N. Bruce (Tulane University, New Orleans).

Avec d'autres pionniers de la précontrainte, Magnel fonde en 1952 la Fédération Internationale de la Précontrainte (FIP), qui devient une organisation technique internationale florissante. En 1996, la FIP fusionne avec le Comité Euro-International du Béton (CEB) pour constituer la Fédération Internationale du Béton/International Federation for Structural Concrete (fib).

Magnel a non seulement écrit plus de 180 articles techniques et scientifiques, mais il a également publié une impressionnante série de livres relatifs à la stabilité des constructions et au dimensionnement des constructions en béton armé et précontraint. Tous ses livres apportent des méthodes de calcul pratiques, dont l'usage est facilité par l'emploi de nombreuses tables et graphiques.

Durant les dernières années de sa vie, Magnel consacre une énergie importante au projet d'une très haute tour de télécommunications à ériger à l'occasion de l'Exposition universelle de 1958 à Bruxelles.

Cette tour en béton armé aurait eu un diamètre de 100 m à sa base et une hauteur de 500 m. La tour aurait été surmontée d'un mât en acier de 135 m de haut. À l'époque, cette construction eût certainement constitué une attraction mondiale. Finalement, en raison de controverses technique et politique, ce projet ne fut pas réalisé.

Gustave Magnel décède inopinément le 5 juillet 1955. Cette disparition subite fut ressentie avec tristesse tant en Belgique qu'à l'étranger.

En octobre 1956, une séance académique est organisée à Gand pour commémorer la mémoire de Gustave Magnel. Plusieurs de ses anciens collègues et amis vinrent de l'étranger. À cette occasion, le professeur R. Evans de l'Université de Leeds s'exprima en ces termes : *"... His concrete laboratory was recognized as one of the best in the world. Hundreds of members of staff and research workers from a large number of universities have had the pleasure and privilege of visiting this excellent laboratory. Magnel always warmly welcomed at his laboratory those who wished to improve their knowledge. .... His gift of friendly intercourse enriched us all by their genial and mellow qualities. Although he often had strong views on technical questions, he was by nature so generous that it was a pleasure even to disagree with him."*

Dans le but de continuer à commémorer sur le long terme les réalisations exceptionnelles du Professeur Magnel, l'Association Générale des Ingénieurs diplômés de l'Université de Gand (AIG) décerne tous les cinq ans la « Médaille d'or Gustave Magnel » au concepteur d'une structure constituant une application importante ou remarquable en béton armé ou précontraint. Les onze premiers lauréats sont : N. Esquillan (1959), P. Blokland (1963), F. Leonhardt (1968), U. Finsterwalder (1973), R. De Keyser (1979), H. Wittfoht (1984), R. Greisch (1988), O. Olsen (1994), M. Virlogeux (1990), J. Schlaich (2004) et J.J. Arenas (2009).

## CONCLUSION

Du survol qui vient d'être fait, il ressort que le Professeur Gustave Magnel était une personnalité exceptionnelle tant du point de vue académique qu'humain. On peut souligner ses principaux accomplissements :

- contribution aux méthodes pratiques de dimensionnement du béton armé ;
- développement d'un système de précontrainte original ;
- développement de méthodes de dimensionnement du béton précontraint et rédaction du premier livre publié en anglais sur le sujet ;
- implication dans la conception et la réalisation du premier pont en béton précontraint et continu au monde ;
- contribution à la réalisation du pont de la *Walnut Lane* à Philadelphie, le tout premier pont en béton précontraint aux USA.

## LE BÉTON PRÉCONTRAINT. PRINCIPES ET ÉVOLUTIONS TECHNOLOGIQUES

**Michel Provost et Jean-Yves Del Forno**

### INTRODUCTION

Le béton précontraint est technologiquement nettement plus complexe que le béton armé. L'objectif du présent article est de rappeler les principes de base de cette technique et de faire une synthèse des procédés utilisés depuis les origines jusqu'aujourd'hui.

### PRINCIPES GÉNÉRAUX ET AVANTAGES DE LA PRÉCONTRAINTE

Dans un élément en béton armé, des barres d'acier (armatures) sont placées dans les zones qui seront mises en traction sous l'effet des actions auxquelles cet élément sera soumis. Mises en traction, ces armatures s'allongent et le béton qui les entoure se fissure (Fig. 1).

Du point de vue structural ces fissures ne sont pas gênantes mais présentent au moins trois inconvénients :

- les armatures sont mises en contact avec le monde extérieur et elles risquent dès lors de se corroder ;
- les fissures réduisent la raideur de l'élément en béton et rendent la structure plus déformable ;
- l'importante variation de contrainte dans les armatures en cas de chargement variable répété peut conduire à une rupture par fatigue, ce qui induit des limitations pour l'utilisation du béton armé dans les ponts.

La précontrainte du béton par laquelle on pré-comprime les parties de la structure qui seront ultérieurement mises en traction élimine ces inconvénients.

En outre, le béton précontraint est moins consommateur d'acier car, contrairement au béton armé, il permet l'utilisation d'acier à haute résistance. Ceci n'est en effet pas possible en béton armé car l'allongement important de ces aciers sous l'effet des tractions auxquelles ils seront soumis conduirait à des fissurations du béton inacceptables en service.

La précontrainte du béton est donc intéressante à plusieurs égards :

- elle conduit à des structures non fissurées qui résisteront mieux dans le temps ;
- elle réduit la consommation de matière de deux manières :
  - en permettant l'utilisation d'acier à haute de résistance ;
  - en permettant, par l'absence de fissuration, la réduction de hauteur des sections de béton à raideur structurale égale.

Le béton précontraint conduit à des structures plus durables, plus soutenables que le béton armé, mais technologiquement beaucoup plus complexes, ce qui va limiter son usage notamment à des ouvrages géométriquement relativement simples.

Elle est principalement utilisée pour des éléments rectilignes ou plans, des poutres et des dalles.

Le domaine des ponts, composés principalement de poutres et de dalles, est donc le domaine de prédilection du béton précontraint. Dans le bâtiment, le béton précontraint est utilisé principalement pour les dalles de plancher et les poutres, le plus souvent dans le cas où elles sont préfabriquées. La précontrainte est également utilisée lorsqu'une étanchéité absolue, aux liquides ou aux gaz, est recherchée (enceinte de confinement des réacteurs nucléaires par exemple).

### PRINCIPES DE PRÉCONTRAINTE DES POUTRES

L'objectif premier est de pré-comprimer le béton ou plus exactement les parties de la poutre en béton qui seront ultérieurement mises en traction sous l'effet des actions auxquelles la poutre sera soumise. Dans le cas d'une poutre isostatique sollicitée du haut vers le bas

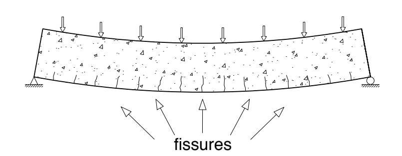



Figure 1 : Poutre en béton armé fissurée par flexion[1]

(Fig. 1), il faudra donc pré-comprimer la partie inférieure de la poutre. Cette mise en précontrainte peut se faire de différentes manières.

## PAR UNE ACTION EXCLUSIVEMENT LONGITUDINALE SUR LA POUTRE

Cette action peut être obtenue par deux forces indépendantes (Fig. 2a). C'est le cas de la précontrainte par culées qui a parfois été utilisée pour les pistes d'aéroport.

Elle peut également être obtenue par deux forces qui s'équilibrent (Fig. 2b). Cette précontrainte pourra être réalisée par des barres ou des câbles mis en tension et placés dans la poutre ou de part et d'autre de celle-ci. Comme il s'agit le plus souvent de câbles, nous utiliserons plutôt ce terme dans la suite sans perdre de vue qu'il peut aussi être question de barres.

Figure 2a : Précontrainte axiale par culées[1]

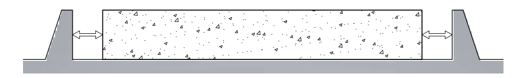
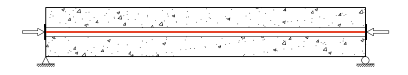


Figure 2b : Précontrainte axiale par barre ou câble[1]



Cette différence entre efforts apportés par des culées ou par des câbles est analogue à la reprise des poussées des arcs, soit externe par des culées, soit interne par un tirant.

Cette action peut être positionnée à différents niveaux :

- à l'axe de la poutre (Fig. 3a). Dans ce cas, toute la section de la poutre sera uniformément comprimée y compris la partie supérieure qui sera mise ultérieurement en compression sous l'effet des actions extérieures. Cette solution n'est pas la plus efficace, sauf si la poutre ne sera ultérieurement soumise qu'à traction pure.

- au niveau inférieur de la poutre (Fig. 3b). Cette solution plus intéressante n'est toutefois pas optimale car elle pourrait mettre en traction la fibre supérieure de la poutre à proximité des appuis, dans des zones où cette fibre supérieure ne sera pas mise en compression par les actions extérieures sur la poutre.

Figure 3a : Précontrainte longitudinale axiale[1]

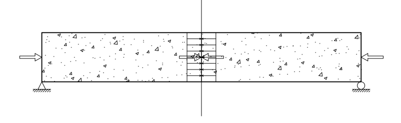
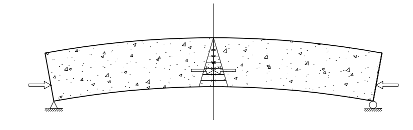


Figure 3b : Précontrainte longitudinale à la fibre inférieure[1]



## PAR UNE ACTION LONGITUDINALE ET TRANSVERSALE SUR LA POUTRE

Cette action transversale sera obtenue par des déviations préliminaires du câble. Lors de sa mise en tension, le câble aura tendance à se mettre en ligne droite et appliquera, sur la poutre, non seulement des efforts longitudinaux, mais également des efforts verticaux agissant de bas en haut. Ces déviations sont soit localisées (Fig. 4a), soit réparties (Fig. 4b). Dans ce cas, la mise en tension du câble exerce sur la poutre une action uniformément répartie qui vient en déduction des autres actions réparties sur la poutre, tel le poids propre.

Figure 4a : Actions transversales localisées[1]

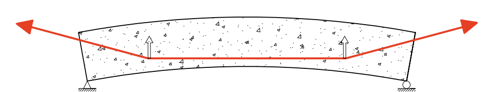
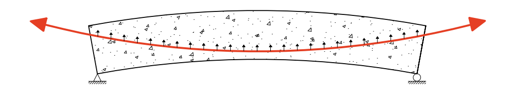


Figure 4b : Actions transversales réparties[1]



La déviation du câble permet donc d'optimiser l'effet de la précontrainte.

La précontrainte agit sur la poutre de deux manières :

- en la comprimant longitudinalement ;

- en la sollicitant dans un plan vertical grâce aux déviations du câble.

La précontrainte est fort simple au niveau des principes ; les difficultés sont technologiques. Celles-ci ne résident pas dans le câble ou la barre proprement dits, mais dans les dispositifs de transfert des efforts de ces éléments vers la poutre. Ces dispositifs sont appelés « ancrages ». Analysons cela au travers des différentes techniques proposées et de leur évolution.

## PRÉ-TENSION - POST-TENSION

Il existe deux grands modes de précontrainte suivant que la mise en tension du câble se fait avant ou après le bétonnage de la poutre. On parle de pré-tension ou de post-tension, les préfixes « pré » et « post » concernant le moment de mise en tension de l'armature par rapport au bétonnage.

Dans le mot « précontrainte » le préfixe « pré » concerne la sollicitation de la poutre en béton qui est bien entendu précontrainte avant sa mise en charge.

Il s'agit donc toujours de précontrainte mais par pré-tension ou par post-tension suivant que les câbles sont tendus avant ou après le bétonnage.

## LA PRÉCONTRAINTE PAR PRÉ-TENSION (OU PRE-TENSIONING)

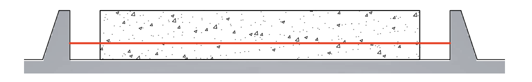
Dans ce cas, des câbles sont ancrés à des culées et tendus. La poutre est bétonnée, puis les câbles sont relâchés (Fig. 5). Le transfert d'effort entre câble et béton se fait par adhérence, et par frottement. En outre, lorsque le câble est coupé, son diamètre augmente par effet poisson ce qui favorise l'adhérence.

Du fait des culées nécessaires à l'ancrage des câbles lors de leur mise en tension, cette technique impose des installations de mise en précontrainte lourdes. La précontrainte par pré-tension se fera donc quasiment toujours en usine. Cette technique est fortement utilisée pour la préfabrication en usine d'éléments de dalles (hourdis) et de poutres pour le bâtiment, les ponts de dimensions réduites et les ouvrages du génie civil.

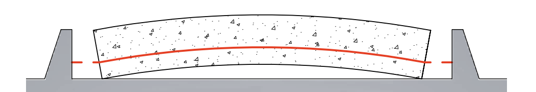
Figure 5 : Précontrainte par pré-tension[1]



1. Mise en tension du câble



2. Bétonnage

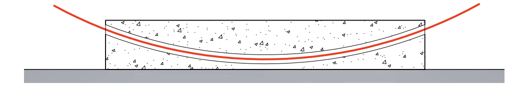


3. Coupure du câble

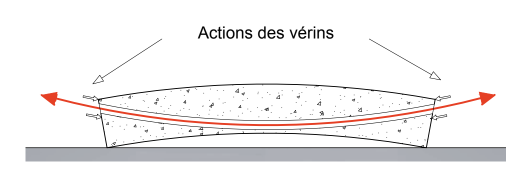
## LA PRÉCONTRAINTE PAR POST-TENSION (OU POST-TENSIONING)

Dans ce cas, la poutre étant bétonnée, le câble est mis en tension après durcissement du béton, au moyen de vérins qui prennent appui sur la poutre (Fig. 6).

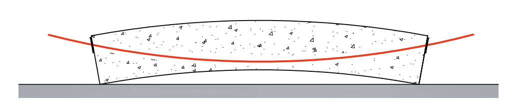
Figure 6 : Précontrainte par post-tension[1]



1. Bétonnage



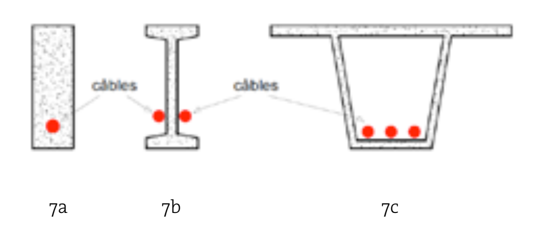

2. Mise en tension du câble



3. Blocage du câble

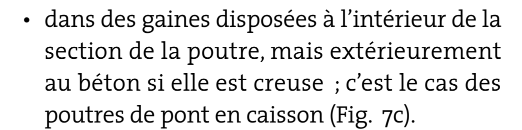
Contrairement à la pré-tension, pour laquelle le câble est forcément noyé dans la poutre, en post-tension le câble peut prendre différentes positions. Il peut être placé :

- dans des gaines disposées intérieurement dans la poutre (Fig. 7a) ;
- dans des gaines disposées extérieurement de part et d'autre de la poutre (Fig. 7b) ;




7a 7b 7c

Figure 7 : Position des câbles par rapport à la poutre[1]





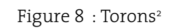


Figure 8 : Torons[2]

- dans des gaines disposées à l'intérieur de la section de la poutre, mais extérieurement au béton si elle est creuse ; c'est le cas des poutres de pont en caisson (Fig. 7c).

Vu que les vérins prennent appui sur la poutre, nous ne rencontrons pas ici les problèmes liés aux culées provisoires, mais la difficulté réside dans la transmission des efforts entre câble et poutre, dans les dispositifs d'ancrage.

Au début du développement de cette technique de nombreux dispositifs d'ancrage ont été utilisés, plusieurs voies ont été explorées mais elles convergent aujourd'hui toutes vers la même solution.

Ces techniques dépendent :

- de l'élément qui sera mis en tension : barre, fil, toron (Fig. 8), câble composé de fils ou de torons ;
- de la manière dont il sera mis en tension : fil par fil, toron par toron, tous les fils ou tous les torons simultanément ;
- de la manière dont la barre, le câble ou ses composants seront « bloqués » : par coincement, par frottement..., individuellement, collectivement.

Ainsi, par exemple, le premier ancrage proposé par E. Freyssinet (Fig. 9), inventeur de la précontrainte, était composé d'un cône mâle et d'un cône femelle, les fils du câbles passant entre les deux. Sous l'effet du relâchement de l'effort dans les vérins, les fils entrainent le cône mâle dans le cône femelle, et se coincent entre les deux cônes. Il y a donc en quelque sorte « auto-blocage ».

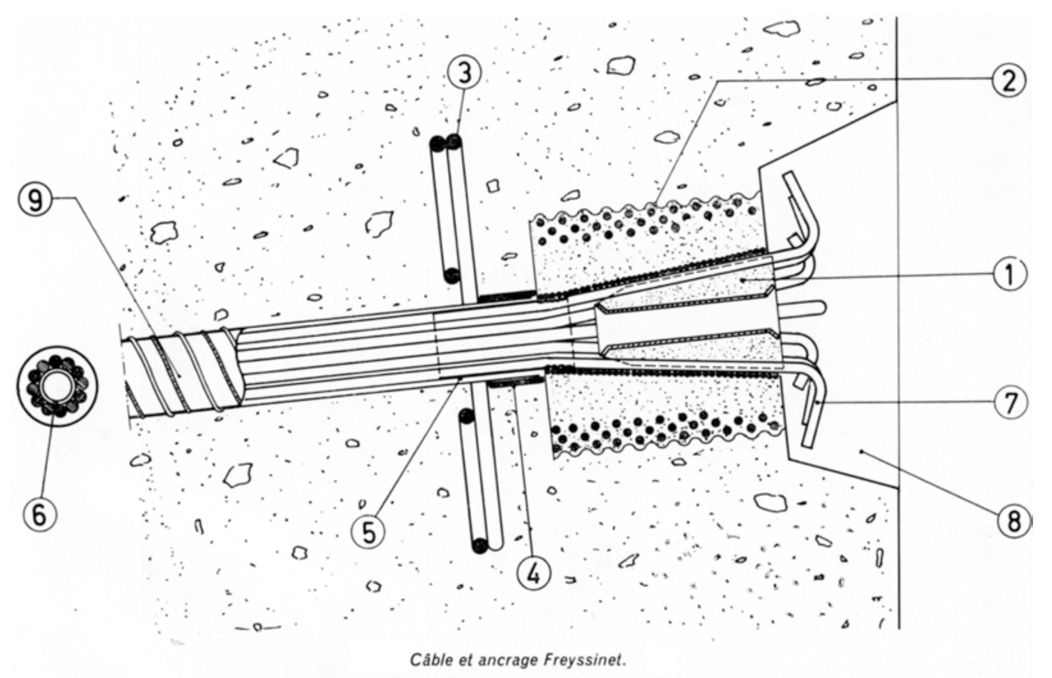



Figure 9 : Ancrage Freyssinet originel[3]

Les figures suivantes (10a à 10k)[1] donnent les principaux systèmes d'ancrage qui ont été et sont utilisés en Belgique. Nous les avons groupés en ancrages « historiques » et ancrages actuels, leur description détaillée est donnée en référence (3) sur laquelle certaines figures sont basées.

## ANCRAGES « HISTORIQUES »

**Ancrage Freyssinet**
*France - 1939*
***Ensemble de fils tendus collectivement***

- Ancrage : par coincement collectif des fils
- Matériau de l'ancrage : béton
- Câbles intérieurs au béton : ensemble de fils placés dans des gaines en feuillard métallique
- Câbles extérieurs au béton : non

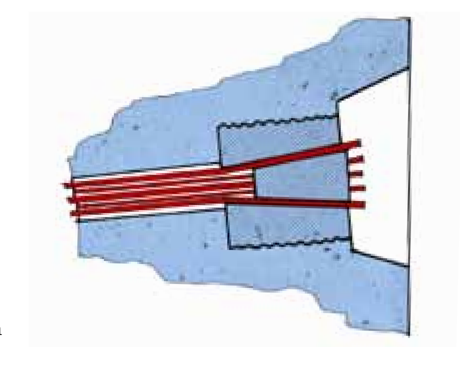


Figure 10a

**Ancrage Blaton - Magnel**
**Entreprise Blaton - Professeur Magnel RUG**
*Belgique - 1942*
***Ensemble de fils tendus deux par deux***

- Ancrage : par coincement des fils 2 par 2 par 2 clavettes plates
- Matériau de l'ancrage : acier
- Câbles intérieurs au béton : ensemble de fils placés dans des logements ménagés dans le béton
- Câbles extérieurs au béton : ensemble de fils protégés par du mortier

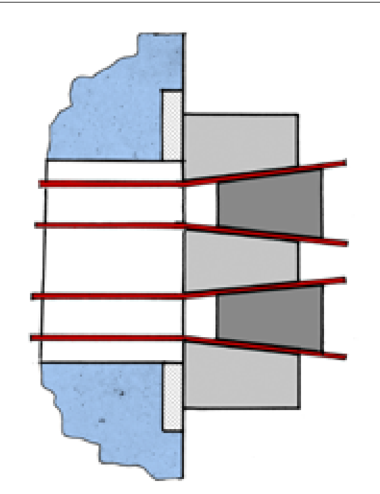




Figure 10b

**Ancrage BBRV**
**Birkenmaier, Brandestini, Ros et Vogt**
*Suisse - 1948*
***Ensemble de fils tendus collectivement***

- Ancrage : par blocage collectif des fils par bulbes
- Matériau de l'ancrage : acier
- Câbles intérieurs au béton : ensemble de fils placés dans des gaines en feuillard métallique
- Câbles extérieurs au béton : non

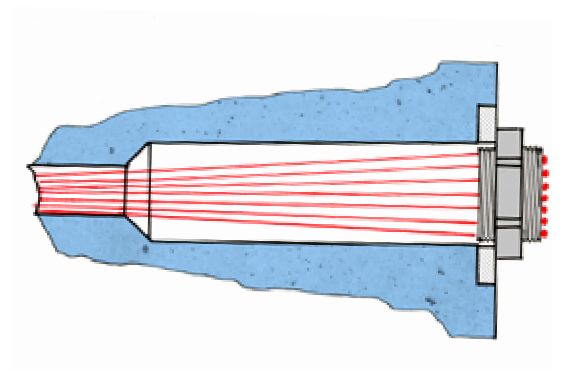


Figure 10c

**Ancrage Franki-Smet**
**Entreprise Franki**
*Belgique - 1951*
***Ensemble fils tendus deux par deux***

- Ancrage : par coincement individuel par clavette conique placée à côté du câble
- Matériau de l'ancrage : acier
- Câbles intérieurs au béton : ensemble de fils placés dans des gaines en feuillard métallique
- Câbles extérieurs au béton : non

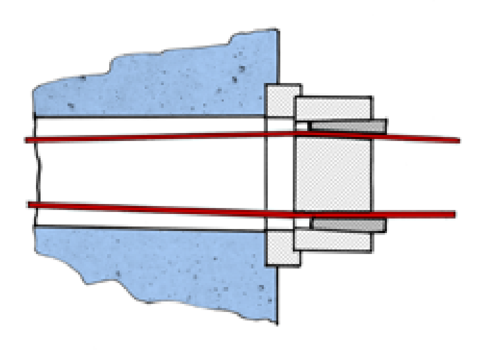


Figure 10d

**Ancrage Dywidag**
*Allemagne - 1951*
***Barres mises en tension une à une***

- Ancrage : par blocage par écrou
- Matériau de l'ancrage : acier
- Barres intérieures au béton : barres placées dans des gaines individuelles en feuillard métallique
- Barres extérieures au béton : oui

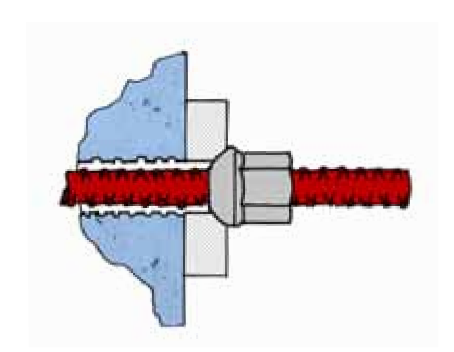


Figure 10e

**Ancrage Strabed**
*Belgique*
***Fils tendus un par un***

- Ancrage : par blocage individuel par bulbe
- Matériau de l'ancrage : acier
- Fils intérieurs au béton : isolés protégés par bandes anticorrosives, groupés placés dans des gaines en feuillard métallique
- Fils extérieurs au béton : oui

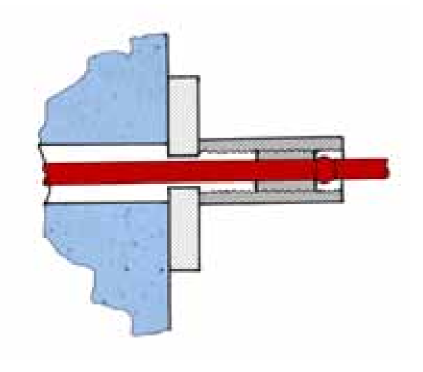


Figure 10f

**Ancrage Freyssinet**
*France*
***Ensemble de torons tendus collectivement***

- Ancrage : par coincement collectif des torons
- Matériau de l'ancrage : acier
- Câbles intérieurs au béton : ensemble de torons placés dans des gaines en feuillard métallique
- Câbles extérieurs au béton : non

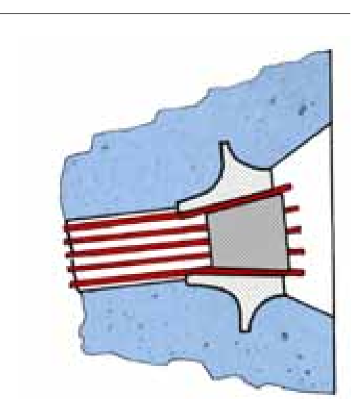
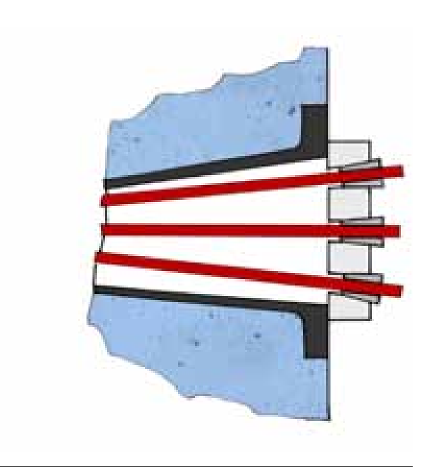
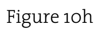


Figure 10g

**Cable Covers Limited**
*Grande-Bretagne*
***Ensemble de fils ou torons tendus collectivement***

- Ancrage : par coincement individuel par frottement dans des clavettes tronconiques enserrant les fils ou les torons
- Matériau de l'ancrage : acier
- Câbles intérieurs au béton : groupes de fils ou de torons placés dans des gaines en feuillard métallique
- Câbles extérieurs au béton : oui




Figure 10h

---

## ANCRAGES ACTUELS

**Par barres**
***Barres mises en tension une à une***

- Ancrage : par blocage par écrou
- Matériau de l'ancrage : acier
- Barres intérieures au béton : placées dans des gaines individuelles en feuillard métallique.
- Barres extérieures au béton : oui

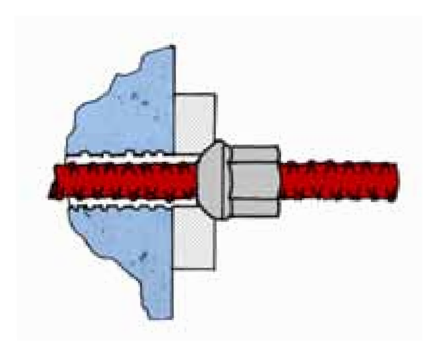


Figure 10i

---

**Par ensemble de torons**
***Ensemble de torons tendus collectivement***

- Ancrage : par coincement individuel par frottement dans des clavettes tronconiques enserrant les torons
- Matériau de l'ancrage : acier
- Câbles intérieurs au béton : ensemble de torons placés dans des gaines en feuillard métallique
- Câbles extérieurs au béton : ensemble de torons placés dans des gaines individuelles en polyéthylène

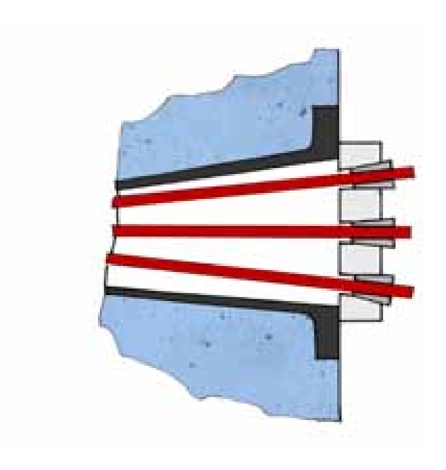


Figure 10j

---

**Par monotoron**
***Torons tendus individuellement***

- Ancrage : par coincement individuel par frottement dans des clavettes tronconiques enserrant les câbles
- Matériau de l'ancrage : acier
- Torons intérieurs au béton : torons isolés dans des gaines individuelles en polyéthylène
- Torons extérieurs au béton : torons isolés dans des gaines individuelles en polyéthylène

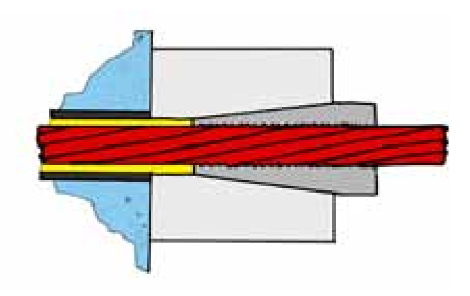


Figure 10k

Aujourd'hui, le plus souvent, les câbles sont formés de torons qui sont mis en tension soit collectivement, soit individuellement pour les très gros câbles (jusque 55 torons). Chaque toron est bloqué séparément par frottement et pincement dans une clavette tronconique rainurée formant cône mâle comme le montre la figure 11 dans le cas d'un toron isolé gainé et protégé par de la graisse.

Lors du relâchement de l'effort dans le vérin, cette clavette est entrainée par le toron dans un cône femelle. Le coincement du cône mâle dans le cône femelle augmente le frottement et bloque le câble.

Pour faire le tour des différents aspects de la précontrainte par post-tension, il nous reste à dire quelques mots des gaines dans lesquelles sont placés les câbles et de la protection de ceux-ci vis-à-vis de la corrosion.

Là aussi, plusieurs techniques étaient d'application aux débuts de la précontrainte. Dans certains cas, les gaines étaient des « réservations » dans le béton obtenues par mise en place puis enlèvement d'un noyau en caoutchouc. Aujourd'hui, les gaines sont en feuillard métallique ou en polyéthylène.

Il en est de même pour ce qui est de la protection des câbles. Au début, dans certains cas, les câbles (extérieurs) étaient simplement protégés par du mortier. Aujourd'hui, les gaines métalliques sont injectées au coulis de ciment et les câbles dans les gaines de polyéthylène sont protégés par de la graisse.

Les toutes dernières évolutions de la précontrainte permettent d'utiliser des torons graissés et protégés chacun par une gaine individuelle. Ces torons ainsi gainés sont positionnés dans des gaines globales en polyéthylène à haute densité, lesquelles sont injectées de coulis de ciment. La protection contre la corrosion est optimale et la protection unitaire à la graisse permet le remplacement d'éventuels torons défectueux, cassés ou corrodés, même après plusieurs années de vie.

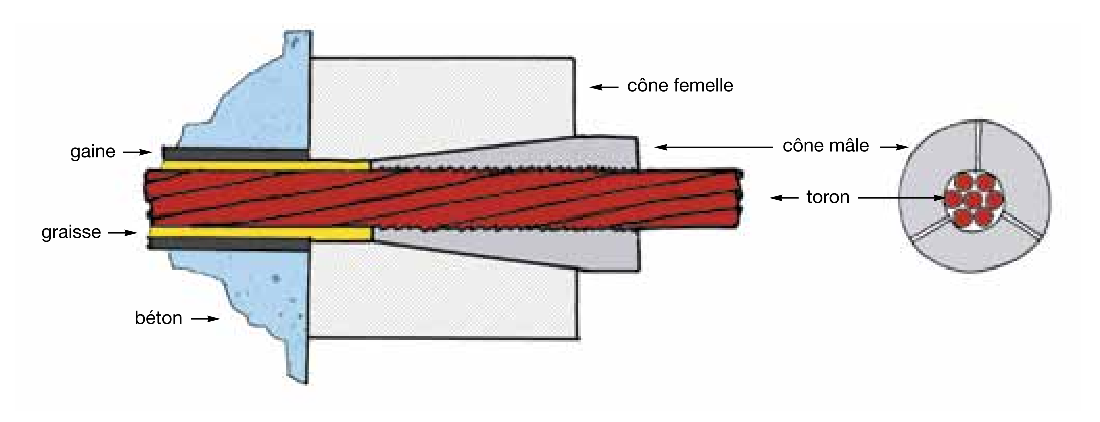
## CONCLUSION

La technique du béton précontraint, dont le développement a commencé aux alentours de la Seconde Guerre mondiale, est depuis quelques années arrivée à maturité. Ceci est illustré par la convergence vers des solutions quasiment identiques des technologies proposées par les divers fabricants.

Le béton précontraint est abondamment utilisé dans le bâtiment principalement pour des éléments de dalles (hourdis) en béton préfabriqués précontraints par pré-tension et pour des poutres également préfabriquées, mais aussi pour des dalles coulées sur place mises en précontrainte par post-tension par des monotorons graissés sous gaine de polyéthylène. Cette technique permet de réduire considérablement l'épaisseur des dalles.

Dans son domaine de prédilection que sont les ponts, la précontrainte est présente sous tous ses aspects. Par des éléments préfabriqués précontraints par pré-tension et des éléments en béton coulé sur place, précontraint, par post-tension intérieure ou extérieure au béton. Dans ce dernier cas les câbles sont protégés par de la graisse et placés dans des gaines de polyéthylène (Fig. 11). Cette technique est comparable à celle utilisée pour les haubans des ponts.

Figure 11 : Dispositif d'ancrage d'un toron sous gaine de polyéthylène[1]



## RÉFÉRENCES

**B. Espion - L'invention du béton précontraint**

[1] Association Eugène Freyssinet (2004). *Eugène Freyssinet. Une révolution dans l'art de construire*. Paris : Presses de l'ENPC.

[2] Anon. (1994). The Veurdre bridge trial arch. *Freyssinet Magazine*, February, 4-5.

[3] Freyssinet, E. (1993). *Un amour sans limite*. Paris : Éditions du Linteau.

[4] Shushkewich, K. E. (2012). Eugène Freyssinet – Invention of prestressed concrete and precast segmental construction. *Structural Engineering International*, 22(3), 415-420.

[5] Freyssinet, E. (1936). *Une révolution dans les techniques du béton*. Paris : Eyrolles.

[6] Freyssinet, E. (1939). *Une révolution dans les techniques du béton* (2ème éd.). Paris : Eyrolles.

[7] Freyssinet, E. (1941). Une révolution dans l'art de bâtir. Les Constructions précontraintes. *Travaux*, N°101, Novembre, 335-359.

[8] Coyne, A. (1930). Perfectionnement aux barrages-poids par l'adjonction de tirants en acier. *Le Génie Civil, 97(8), 186-187.*

[9] Drouhin, M. (1935). Consolidation du barrage des Cheurfas par tirants métalliques mis en tension. *Annales des Ponts & Chaussées,* 105 (8), 253-273.

[10] Fernandez Ordoñez, José A. (1979). *Eugène Freyssinet*. Barcelone : 2c editions.

[11] Freyssinet, E. (1928). L'amélioration des constructions en béton armé par l'introduction des déformations élastiques systématiques. *Le Génie Civil,* 93(11), 254-257.

[12] Freyssinet, E. (1949). Souvenirs. *Cent ans de béton armé*. Paris : Science & Industrie (supplément à la revue *Travaux*, N° 194 bis), 51-61.

[13] Freyssinet, E. (1954). Naissance du béton précontraint et vues d'avenir. *Travaux*, N°236, Juin, 463-474.

[14] Grote, J. & Marrey, B. (2000). *Freyssinet, la précontrainte et l'Europe*. Paris : Éditions du Linteau.

[15] Harris, A. (1997). Freyssinet : the genius of prestressing. *The Structural Engineer*, 75 (12), 201- 206.

[16] Möll, H. (1954). *Spannbeton*. Stuttgart : Berliner Union.

[17] Oppermann, R. (1940). Grundlagen für die Ausführung von Spanbetonträgern. *Beton und Eisen,* 39(11), 141-150.

[18] Pelke, E. (2011). Prestressing of bridges in Germany up to 1965: part 1. *Proceedings of the ICE: Engineering History and Heritage,* 164 (EH2), 99-108.

[19] Walley, F. (1984). The childhood of prestressing-an introduction. *The Structural Engineer*, 62A(1), 5-10.

**L. Taerwe – Contributions de Gustave Magnel au développement du béton précontraint**

[1] Taerwe, L. (2005). Contribution of Gustave Magnel to the development of prestressed concrete, *Proceedings of the Ned H. Burns Symposium on Historic Innovations in Prestressed Concrete*, ACI-SP 231, 1-14.

[2] Magnel, G. (1951). Continuity in Prestressed Concrete, In *Prestressed Concrete Statically Indeterminate Structures* (R.P. Andrew and P. Witt (Eds.)), Cement and Concrete Association, 77-86.

[3] Magnel, G. (1948). *Prestressed Concrete*, Concrete Publications Ltd., London, First Edition.

[4] Riessauw, F. (1980). The Magnel Laboratory for Reinforced Concrete, *PCI Journal*, 25(6), 68-69.

[5] Riessauw, F. & Taerwe, L. (1980). Tests on two 30-year-old prestressed concrete beams, *PCI Journal*, 25(6), 70-72.

[6] Zollman, C. (1978). Magnel's impact on the advent of prestressed concrete, *PCI Journal*, 22-48.

[7] Zollman, C., Depman, F., Nagle, J., & Hollander, E. (1992). Building and Rebuilding of Philadelphia's *Walnut Lane* Memorial Bridge, *PCI Journal*, 66-82.

[8] Anon. (1954), *Engineering News Record.*

**M. Provost et J.-Y. Del Forno - Le béton précontraint. Principes et évolutions technologiques**

[1] Crédits photographiques: ORIGIN Architecture & Engineering

[2] www.pcsteelwire.fr/

[3] (1964).*Le béton précontraint obtenu par mise en compression ultérieure au bétonnage*. Note d'information technique 49 du Centre scientifique et technique de la construction (CSTC), 13

# 4. LES PONTS EN BÉTON ARMÉ ET PRÉCONTRAINT

Le béton étant un matériau « pierreux », résistant en compression, mais faible en traction, il est assez logique que la forme structurale des ponts en béton ait d'abord été, comme dans les ponts en maçonnerie, l'arc, qui fonctionne principalement en compression. Liège, avec la passerelle Mativa (55 m) réalisée en 1905 sur projet Hennebique, peut s'enorgueillir de posséder un ouvrage d'art exceptionnel dans l'histoire du béton armé. Vers la même époque, deux ingénieurs débutent une carrière de concepteur de ponts qui sera particulièrement féconde. Robert Maillart, en Suisse, développe techniquement et esthétiquement de 1901, avec Pont de Zuoz (38 m), jusqu'en 1930, avec le Pont du Salginatobel (90 m), le concept du pont de petite et moyenne portée en arc en caisson associé à une dalle de tablier. Eugène Freyssinet, qui réalise ses premiers ponts en béton dans l'Allier en 1907, porte l'art de construire des ponts en béton armé à son apogée avec, en 1930, les arcs de 170 m d'ouverture du pont de Plougastel. L'invention de la précontrainte, une « révolution dans l'art de bâtir » comme la qualifiait son inventeur Freyssinet, va ouvrir la voie, après la Seconde Guerre mondiale, à la construction des ponts à poutres. La précontrainte par post-tension permettra les grands ponts construits en encorbellement, les ponts construits à l'avancement, les ponts poussés..., et est également, par sa nature, à l'origine des ponts haubanés. Mais la précontrainte par post-tension est une technique sophistiquée dont la conception de détail et la mise en œuvre requiert de grands soins car ses armatures sont très sensibles au risque de corrosion. Les deux derniers articles de ce chapitre exposent des pistes de remédiation aux problèmes posés par la corrosion des armatures de précontrainte dans des ponts.

## LA PASSERELLE MATIVA À LIÈGE - PATRIMOINE EXCEPTIONNEL. 1905

**Jean-Marie Crémer**

La passerelle Mativa (Fig. 1) se situe au sud de la ville de Liège, à quelques centaines de mètres à l'aval du confluent de la Meuse et de l'Ourthe, où elle enjambe la Dérivation, celle-ci étant un chenal regroupant plusieurs petits bras de la Meuse.

### LIÈGE ET L'EXPOSITION UNIVERSELLE DE 1905

À la fin du 20ème siècle, Liège était le premier centre industriel de la grande puissance mondiale qu'était alors la Belgique. Pour célébrer le 75ème anniversaire de l'indépendance de la Belgique, Liège est chargée de l'organisation d'une Exposition universelle en 1905 et réalise ainsi une fantastique campagne de promotion. C'est une grande réussite et Liège, cette année-là, accueille sept millions de visiteurs.

Le site de l'Exposition s'étendait au sud de la ville sur les rives gauche et droite de la Meuse et sur l'île séparant les deux bras du fleuve. Trois nouveaux ponts furent construits pour faciliter les accès au site : Fragnée, Fétinne et Mativa.

### LE PROJET DE HENNEBIQUE POUR LA PASSERELLE MATIVA

Initialement, Hennebique n'aurait pas dû réaliser la passerelle Mativa. Sa venue à Liège fut la conséquence du fait que le projet de passerelle provisoire en bois proposée par la Ville ne satisfaisait pas les organisateurs de l'Exposition qui voulaient un ouvrage à la mesure de l'événement. Contacté par le responsable des finances de la ville, Hennebique fut le seul à envisager de relever le défi que constituait la construction d'un pont en quatre mois



Figure 1 : La passerelle Mativa (1905), sur la Dérivation à Liège[1]

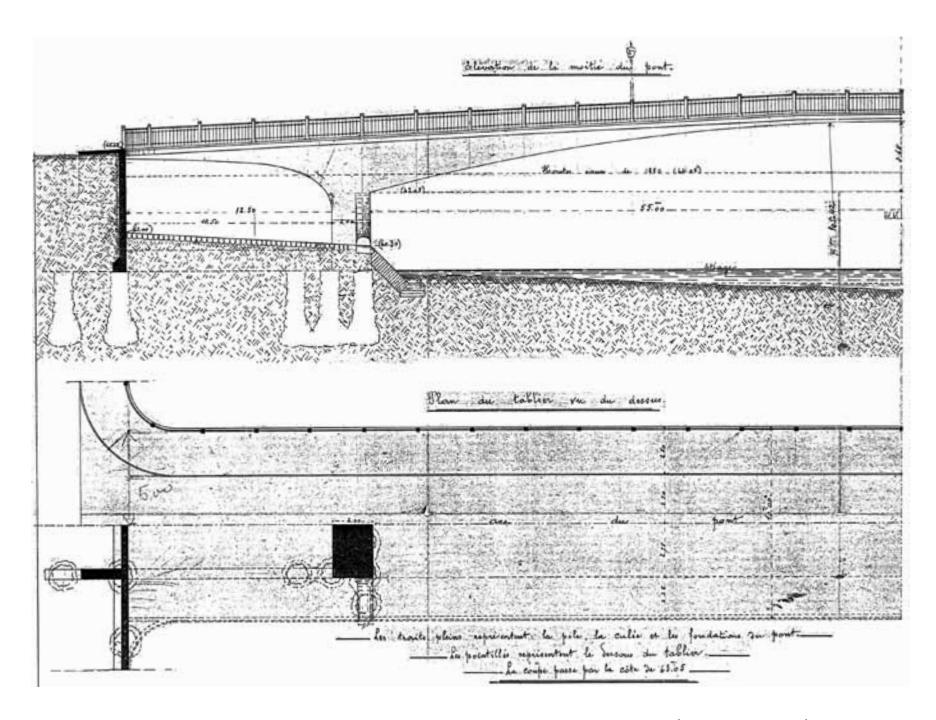


Figure 2 : Élévation, plan et coupe de la passerelle Mativa[2]

seulement. Conscient de la formidable publicité que lui apporterait l'ouvrage, il le voulait d'une légèreté sans pareille afin de prouver la suprématie du béton face à l'acier.

Sa première idée était un pont en treillis en béton, mais les évidements, s'ils ôtaient de la matière, accroissaient par trop le prix du coffrage. La seconde proposition, qui ressemblait à un pont haubané, fut immédiatement rejetée. Le troisième projet fut retenu et il en résulta ce que l'on peut encore voir aujourd'hui : un pont exceptionnel.

## CE QUI SE FAISAIT DE MIEUX EN BÉTON ARMÉ À CETTE ÉPOQUE

En France, en même temps qu'à Liège, Hennebique construisit en 1904 le pont de Decize sur la Loire (portées 50 et 56 m) dans la Nièvre (Bourgogne). Cet n'ouvrage n'existe plus. Plus tard, en s'inspirant de ses expériences à Liège et à Decize, il construisit le pont du Risorgimento, sur le Tibre à Rome (janvier 1910 à novembre 1911) qui devint le record mondial des ponts en béton armé avec une portée de 100 m.




Figure 3 : La passerelle Mativa lors de l'Exposition universelle de 1905[3]

## CARACTÉRISTIQUES HORS DU COMMUN DE LA PASSERELLE MATIVA

Elles sont au nombre de quatre, à mettre en relation avec la nouveauté de la technique.

- Surbaissement de l'arc : le rapport entre la flèche de l'arc et la portée franchie est de 1/15 pour Mativa, contre 1/12 pour Decize ou 1/10 pour Rome.
- Finesse en clef : l'épaisseur totale du pont à la clef (arc + tablier) n'est que de 35 cm, valeur exceptionnellement faible.
- Vitesse d'exécution : commencée le 9 décembre 1904, la construction fut déjà achevée le 20 mars malgré un hiver rigoureux et des crues importantes.
- Coût : La revue « Le Béton Armé » nous communique différents prix unitaires : 125 Fr / m² de tablier pour Liège, 175 pour Decize, et 610 pour Rome.

Cet ouvrage fut l'ambassadeur de la Société Hennebique : en 1939, le numéro 378 de

la revue « Le Béton Armé » éditée par Hennebique fête les 50 ans de ce matériau en Belgique. Dans le magazine le « fameux pont sur la Dérivation de l'Ourthe » figure en bonne place, ce qui montre l'intérêt particulier que la maison Hennebique, 35 ans après, réservait toujours à son ouvrage liégeois.

## FONCTIONNEMENT STRUCTURAL

L'examen détaillé[5] du fonctionnement structural de la passerelle amène à se poser des questions sur le schéma adopté par Hennebique pour justifier la stabilité de son ouvrage. Des recherches récentes effectuées par Jean-Marie Bleus dans les archives du Fonds Hennebique à l'IFA ont permis de retrouver des documents de la main du concepteur indiquant le principe de fonctionnement en arc.
Suivant ce principe, des efforts obliques à prédominance horizontale s'exercent en tête des piles fondées sur pieux « Compressol-Dulac » qui s'appuient verticalement sur le gravier de Meuse et horizontalement sur le limon de couverture.

## CONSTRUCTION DE LA PASSERELLE MATIVA PENDANT L'HIVER 1904-1905

La réalisation des pieux de fondation utilise la toute nouvelle méthode de réalisation de pieux moulés en béton connue sous le nom « système Compressol-Dulac », à savoir l'enfoncement dans le sol par compression du sol en place.

Ensuite est installé un coffrage en bois s'appuyant sur des supports eux-mêmes en bois enfoncés dans le lit du bras du fleuve, et ce malgré les montées des eaux (Fig. 4). Mettant en œuvre les matériaux pendant l'hiver, Hennebique dû prendre des précautions pour éviter le gel pendant le durcissement du béton.

## MISSION CONFIÉE AU BUREAU GREISCH PAR LA VILLE DE LIÈGE

- Vérifier l'état de l'ouvrage ;
- Donner un avis sur la pérennité ;
- Proposer les mesures pour assurer la viabilité sur base des critères actuels.

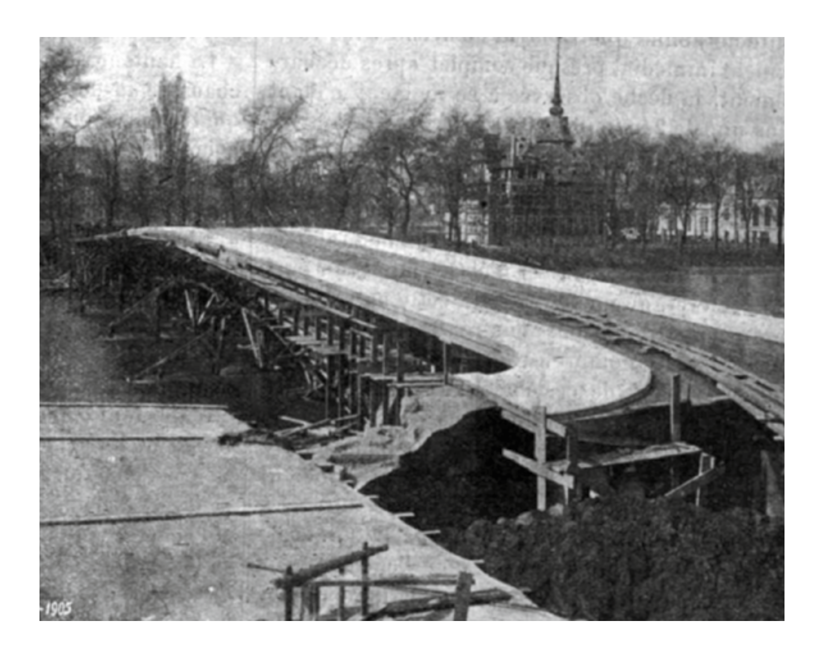



Figure 4 : La passerelle Mativa en cours de construction[4]

Sur base des caractéristiques du sol en place, les vérifications montrent que ni la butée du sol, ni les piles et les pieux de fondation ne sont capables de reprendre les efforts horizontaux de poussée des arcs ! Pourtant, son comportement et plus spécifiquement sa déformation prouvent que le pont fonctionne bien comme Hennebique l'a prévu. Nous pensons donc que l'hypothèse la plus plausible se trouve dans un massif de fondation sous les piles, beaucoup plus efficace que supposé (pieux jointifs). À défaut de pouvoir le contrôler, car cette opération est très onéreuse, il faut, pour assurer la pérennité de l'ouvrage, renforcer la capacité de reprise des efforts horizontaux par les fondations.

Hormis cette question fondamentale, l'ouvrage peut être considéré comme sain, exempt de pathologie récente, et répondant aux normes actuelles dans la mesure où il ne porte pas de charges d'exploitation. Il convient cependant d'envisager le remplacement de la membrane d'étanchéité sous revêtement et de procéder à des restaurations mineures : réparations de poutres de rives, passivation des armatures apparentes et ragréage, réparation des garde-corps... Pour répondre aux contraintes actuelles d'exploitation en tant que passerelle, il faut effectuer des renforts. La solution retenue consiste à renforcer le tablier à l'aide de lamelles ou tissus de carbone et de renforcer les fondations du pont grâce à un chevalet pieux-tirants.

Une proposition de classement comme Patrimoine exceptionnel de Wallonie a été introduite auprès de la Région.

# LA CONCEPTION DES OUVRAGES EN BÉTON ARMÉ AU DÉBUT DU 20ÈME SIÈCLE : APPROCHES VISIONNAIRES DE ROBERT MAILLART. 1872-1940

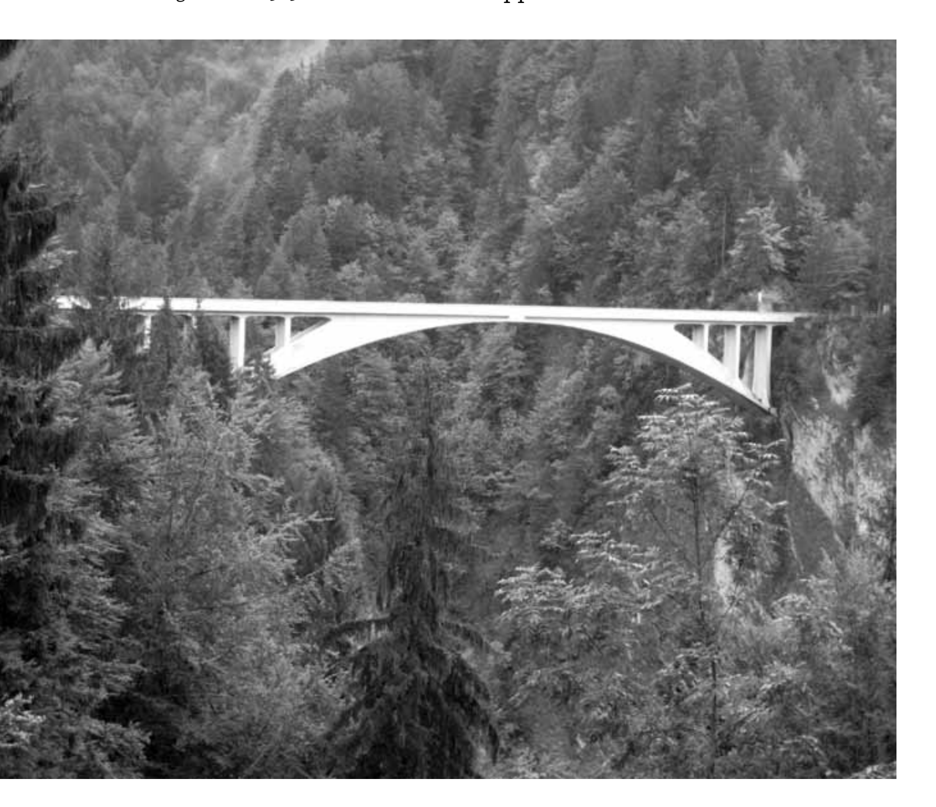
**Denis Zastavni**

## INTRODUCTION

La dimension innovante de l'œuvre de Robert Maillart en matière de conception en béton ne se conçoit que mise en perspective dans l'histoire de la construction et des matériaux de structure. Plus particulièrement du béton. Ce propos nous mènera sur le terrain de la conception structurale contemporaine avec le béton.

Nous commencerons par contextualiser historiquement notre analyse. Puis un détour par nos approches contemporaines permettra d'expliquer les aspects les plus révolutionnaires de l'approche de Maillart. Dans la manière dont la complexité intrinsèque du béton a été considérée, certaines difficultés proviennent du comportement du béton au regard des théories classiques de la mécanique. Si nos théories modernes ont apporté une réponse au problème, Maillart avait déjà trouvé une manière convaincante de le gérer. En examinant le statut qu'il donnait au matériau lorsqu'il était question d'aborder la conception structurale d'un ouvrage, et les méthodes qu'il a employées pour atteindre ses objectifs, nous verrons ce qui fait tout l'intérêt de son approche et de son œuvre.

Figure 1 : Pont du Salginatobel, 1929[26]



## PRÉSENTATION DE L'ŒUVRE DE MAILLART

L'ingénieur suisse Robert Maillart naît en 1872 et décède en 1940. Il travaille sur plus de 300 structures - parmi lesquelles on trouve une cinquantaine de ponts - entre la fin du 19ème siècle et 1940[1,2]. Maillart était connu pour les formes innovantes qu'il donnait à ses structures réalisées en béton armé. À cette époque où le béton était associé à un matériau lourd mis en œuvre dans des structures d'aspect très massif, Maillart produisait des structures en béton d'une légèreté inégalée mais avec un degré important de fiabilité et de durabilité. Ceci signifie qu'il est question d'une approche pleinement rationnelle pour l'élaboration des schémas structuraux de ses ouvrages.

À l'époque où il pratique, la réflexion sur la forme qu'il convient de donner au béton bat son plein. La part d'innovation la plus manifeste portée par Maillart concerne les formes et les systèmes structuraux. Il est notamment question du « Système Maillart », l'arc-caisson en béton armé, qu'il invente en 1901[3].

Maillart promeut et fait usage de différentes typologies structurales pour les ponts en béton :

- les arcs à trois articulations pour lesquels il propose des formes révolutionnaires ;
- les arcs raidis qu'il invente en transposant au béton des principes suggérés par Ritter ;
- des arcs avec une ligne des pressions fortement excentrée, à savoir fléchis ;
- des ponts-poutres continus aux formes singulières.

Pour les bâtiments, il promeut une vision toute personnelle des dispositions structurales connues sous le nom de dalles-champignons.

Méthodologiquement, Maillart innove par l'usage de la statique graphique comme d'un outil de conception pour la forme structurale - la morphogenèse. En effet, lorsque Karl

Culmann[4] imagine en faire une discipline cohérente et pleinement constituée, c'est dans la perspective différente de l'employer pour l'analyse structurale.

Maillart maîtrisait les arrangements structuraux complexes en employant intuitivement des principes structuraux contemporains établis et démontrés bien plus tard. La complexité du comportement du béton armé est gérée en s'appuyant sur le statut spécifique donné au matériau au sein du schéma structural[5]. Il gérait pareillement la complexité des travaux de ferraillage au sein des structures, optant pour des dispositions qui étaient aisément mises en œuvre.[3]

## REPÈRES HISTORIQUES

L'histoire du béton armé débute aux environs du milieu du 19ème siècle. L'idée du ferraillage vient de Lambot et Monier. Des structures combinant fer et béton font ensuite rapidement leur apparition avec Coignet et Wilkinson. Dès 1880, des brevets sont déposés sur des éléments de structure en béton armé (en particulier de poutres). Les premiers ponts en béton apparaissent également à cette époque.[6,7,8]

L'étrier proposé par François Hennebique en 1892 complète l'étude de la composition interne des poutres entamée par Monier, Koenen et d'autres. Dès lors, la logique des dispositions de ferraillage devient complète.

Avec le béton armé, cette pierre reconstituée change de statut : d'un matériau associé avec des murs et des massifs, souvent fissurés, il devient un matériau fin, léger, étanche et même « élastique ». Il devient à même de concurrencer l'acier et le bois.

La conception de formes structurales en béton et leur calcul sont des pratiques différentes. Différents aspects doivent être pris en compte pour atteindre des dispositions sensées. Une réflexion quant aux formes adéquates doit être menée. À l'époque, concevoir la forme signifiait raisonner en termes de systèmes, qui étaient une association particulière de fer et de béton au sein d'une section prédéfinie. Les méthodes de calcul n'étaient pas diffusées.

## LES APPROCHES CONTEMPORAINES

De nos jours, ces méthodes sont décrites dans les normes et nous disposons d'outils pour gérer les analyses structurales complexes. Mais les capacités limitées de résistance du béton en traction, ses modalités d'interaction avec l'acier de ferraillage, la fissuration et les modifications des propriétés mécaniques qu'elle entraîne, le fluage et le retrait, l'importance de l'historique de chargement s'accommodent très imparfaitement de l'approche élastique employée par les logiciels de calcul classiques. Si on y ajoute les imprécisions de l'exécution et des forces ou réactions réellement rencontrées, qui contrastent avec la précision de l'analyse numérique et la questionnent, le regard porté sur la conception peut devoir être reconsidéré.

On sait depuis les travaux de Kazinczy en 1914, puis ceux de John Baker en 1926 toute la différence qu'il peut y avoir entre l'analyse élastique la plus rigoureuse et les contraintes mesurées dans une structure réelle[10]. Ceci a mené à l'approche gouvernée par le calcul plastique. Celle-ci a été énoncée en russe dès 1936 par Gvosdev. La version internationale en langue anglaise date de 1949-50 avec les travaux de Greenberg, William Prager et Horne. Ses théorèmes (le théorème statique, dit de la borne inférieure et le théorème cinématique, dit de la borne supérieure) caractérisent la réponse structurale dans un état proche de la ruine. Ils mènent chacun à des méthodes analytiques propres, mais surtout lèvent la plupart des objections énoncées ci-dessus.

En particulier, le théorème statique fournit un cadre théorique particulièrement approprié à la conception structurale, ce qui permet de prendre ses distances pour la majorité du processus de conception avec toute la lourdeur et les contraintes de l'analyse structurale. Et ce contexte sera celui auquel Maillart recourt, bien intuitivement, dès la fin des années 1800.

Le contexte du calcul plastique s'applique à celui de l'usage de matériaux plastiques idéaux. S'il est des stratégies pour s'accommoder néanmoins de matériaux « normalement » ductiles, il est cependant pleinement justifié de l'appliquer à des matériaux fragiles si des formes de précontraintes s'y appliquent, ou là où agit le poids propre, ce qui s'avère particulièrement judicieux pour le béton, même non armé[11]. C'est précisément la raison pour

laquelle Jacques Heyman applique l'approche avec succès aux maçonneries anciennes[12].

## LES INNOVATIONS DE MAILLART

Pour concevoir un ouvrage, Maillart se donne une série de règles implicites ou de considérations quant au béton armé et à son comportement structural :

- il voit dans le béton une pierre artificielle moulée à laquelle les principes de la maçonnerie s'appliquent ;
- la présence de renforcements en acier lui permet de mettre au point des connexions singulières et, ceci systématiquement dans un second temps, de travailler à la résistance en flexion de ses structures ;
- le béton tend au monolithisme, de sorte que les principes d'intégration des parties les unes aux autres s'imposent lors de la conception des sections ;
- les fissures sont cependant inévitables, se comportant comme des joints (dans une maçonnerie) de sorte que des sections rigides discontinues et articulées entre elles peuvent être conçues ou activées dans la structure.

Ces règles de composition permettent à Maillart de concevoir ses différentes typologies structurales.

Avec le pont de Zuoz de 1901, Maillart invente l'arc-caisson en béton armé, le premier caisson jamais construit[3]. À l'origine de ce dispositif, est une section en U qu'il donne à l'arc supposé fonctionner à la manière des voûtaisons en maçonnerie. Dans la lignée des recommandations de Wilhelm Ritter, il articule l'arc en trois points pour éviter tout endommagement.

Ensuite, ce principe de l'intégration des sections mène simplement à la création de connexions rigides entre l'arc et les murs qui portent le tablier, puis avec le tablier lui-même. Le premier arc-caisson en béton était créé, et il n'y avait alors aucun moyen de calculer la structure ainsi constituée (selon Ritter[3,9]).

En raison de cette complexité, Maillart négligeait ou laissait de côté tout élément mineur de la composition structurale pour être en mesure de vérifier la stabilité de l'ensemble. Cela signifie que Maillart identifiait d'abord des mécanismes indépendants (l'arc, la dalle du tablier, les poutres du tablier, etc.) et les associait à l'ensemble. Ensuite, il ne tenait compte que de certains éléments spécifiques de cette association complexe ; en d'autres termes, il se référait seulement à certains schémas statiques particuliers au sein de la structure réelle. Cette manière intuitive de procéder est très proche de nos approches modernes qui seraient liées au théorème statique du calcul plastique[13]. Si cette méthode n'est pas employée de la manière la plus élégante et considérée pour la conception du pont de Zuoz, l'approche se rationalise avec ses œuvres postérieures.

Le pont de Tavanasa de 1905 (Fig. 2) poursuit la démarche suivie à Zuoz. Des variations d'inertie sont consciencieusement appliquées aux sections successives de l'arc, en considération du principe de l'arc à trois articulations. Les différentes sections sont affinées et s'hybrident en fonction de leur fonction structurale : tantôt entre la section en U et les sections TT, tantôt entre le caisson et les sections ouvertes.

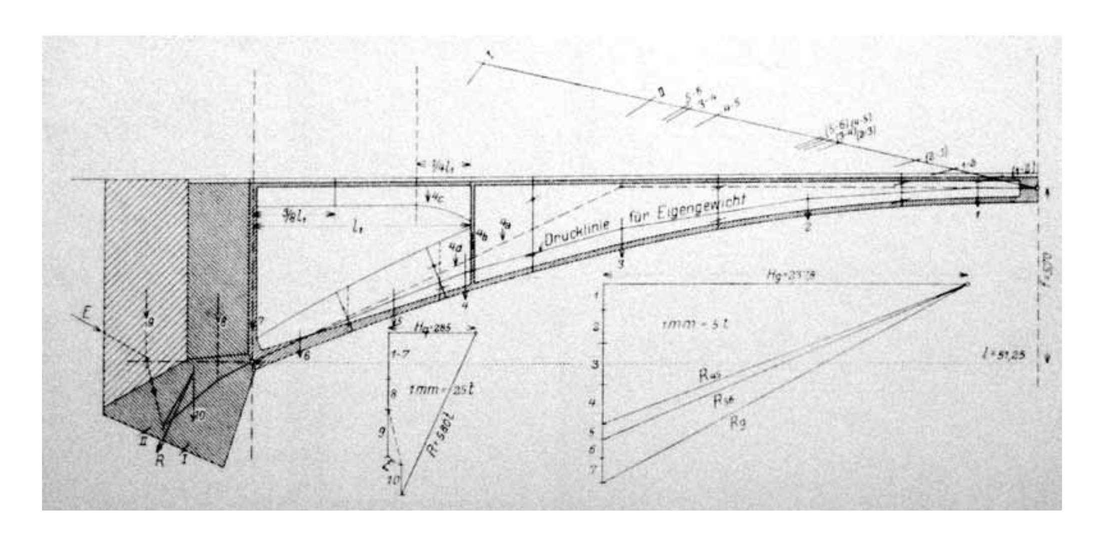



Figure 2 : Épure du Pont de Tavanasa, 1905[20]

L'approche s'illustre particulièrement avec les ponts en arcs raidis. Il s'agit de l'association complémentaire de deux principes structuraux distincts : un arc funiculaire et un tablier jouant le rôle de poutre raidisseuse pour l'arc. C'est l'inversion parfaite du principe du pont suspendu, comme suggéré par son professeur Wilhelm Ritter[14]. Il s'agit aussi d'une nouvelle application du théorème statique du calcul plastique : deux systèmes structuraux distincts et élémentaires associés au sein d'une même structure.

Pour activer ces mécanismes, il s'agit de concevoir des différences de rigidité flexionnelle suffisamment importantes pour chaque élément de construction et des rigidités suffisamment différentes eu égard aux forces de compression. De cette manière, on spécialise certains éléments dans la reprise des efforts de flexion, et d'autres dans la reprise des efforts de compression, tantôt pour la reprise du poids propre et tantôt pour les charges d'exploitation. Le ratio des rigidités développées à l'égard des forces de compression est atteint en agissant sur la géométrie. La disposition correcte des membrures est la clef qui permet de développer des résistances importantes vis-à-vis des forces axiales. Cette question est gérée par la statique graphique.

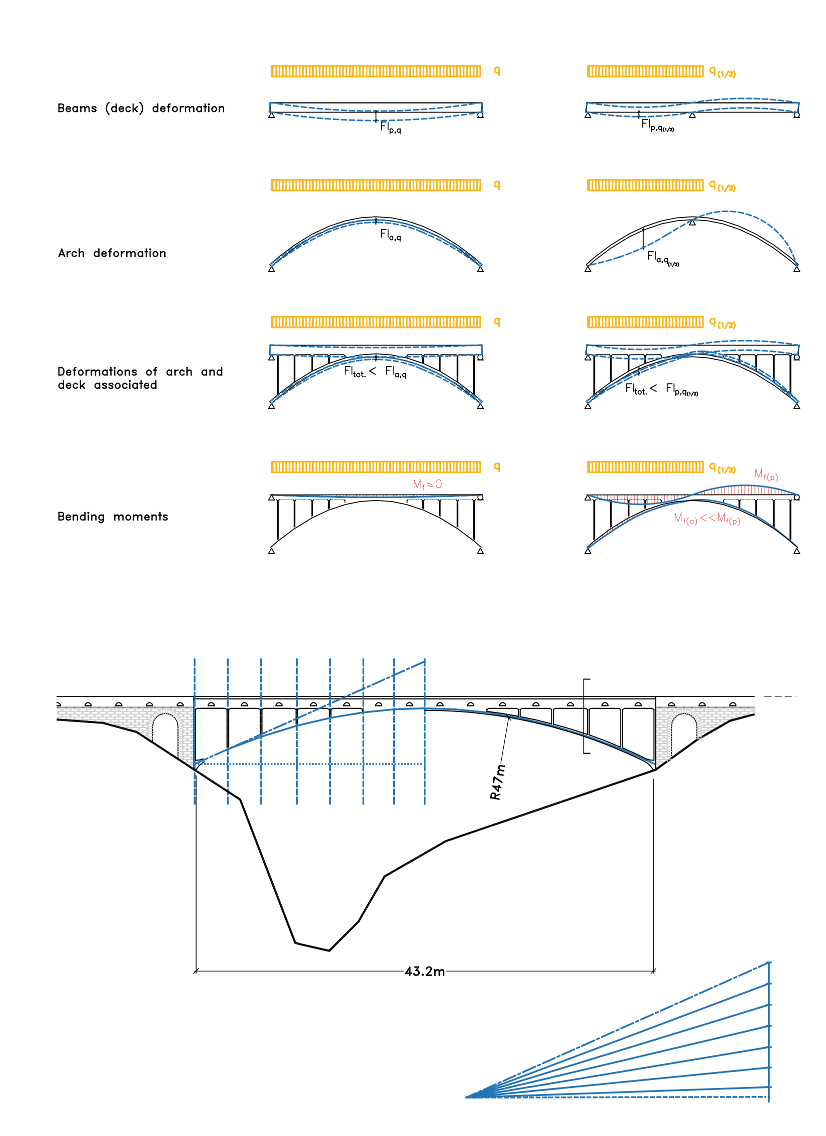



Figure 3 : Pont du Val Tschiel, 1924[21]



Figure 4 : Mécanisme du pont en arc raidi[22]

Figure 5 : Conception du Pont du Val Tschiel[23]

Figure 6 : $M_f$ sur le pont du Val Tschiel[24]

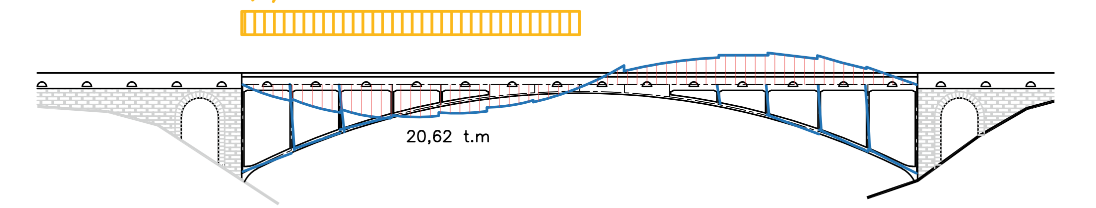
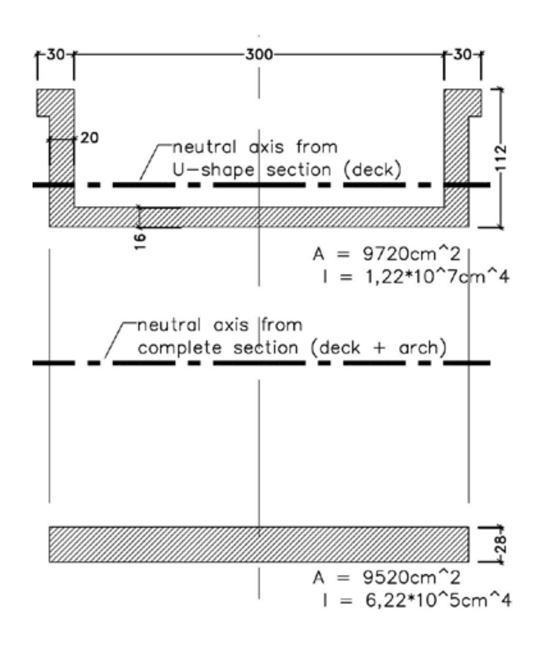
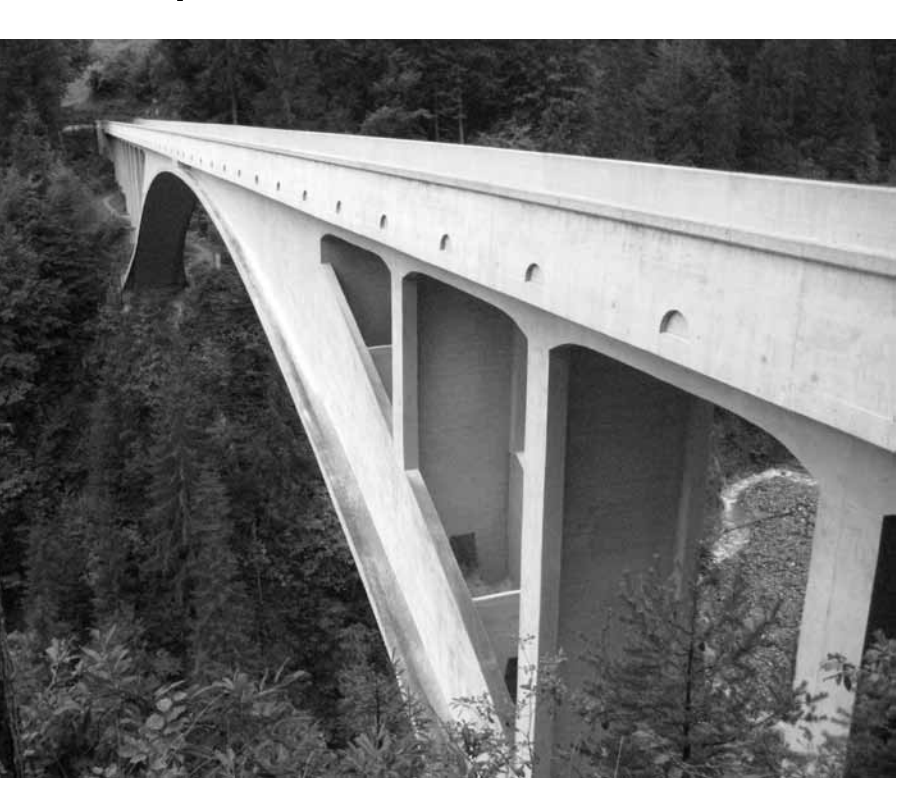



Figure 7 : Caractéristiques mécaniques du pont du Val Tschiel[25]




Par la définition judicieuse des rapports de rigidité entre l'arc et le tablier, les interactions indésirables entre éléments sont évitées, quelle que soit la complexité de l'arrangement structural.

Figure 8 : Pont du Salginatobel, 1929[26]



Les premières fois que ce principe est mis en œuvre, l'arc est resté circulaire avec une ligne des pressions funiculaire très proche de son axe. Plus tard, Maillart étudie la géométrie des arcs pour suivre parfaitement la ligne funiculaire correspondant à un cas de charge de référence, comme pour le pont de Schwandbach (1933).
Une analyse numérique démontre que le fonctionnement structural est conforme aux principes énoncés ci-dessus, qui sont davantage l'essence de l'approche de Maillart de la question structurale qu'une interprétation du comportement structural à l'œuvre.
On peut de la même manière se demander si Robert Maillart était obligé d'employer la statique graphique parce qu'il n'aurait pas eu d'alternative pour calculer ses structures.

Dans le pont du Salginatobel (1929) (Fig. 1 et 8), on observe les influences convergentes des premiers arcs à trois articulations de Maillart et des ponts en arcs raidis. Son comportement structural est celui d'un arc articulé.

La réalisation récursive d'épures de travail en statique graphique a permis à Maillart de mener un important travail sur la définition des sections symétriques en caisson[15] : les proportions de l'ouvrage et les caractéristiques mécaniques évoluent constamment le long du pont.

Les épures qui nous sont parvenues, montrent comment Maillart s'est assuré qu'il était parvenu à la forme correcte pour permettre au mécanisme structural qu'il avait défini d'être effectif[15]. L'histoire des sciences de l'ingénieur regorge de méthodes algébriques ou de méthodes ayant recours à l'analyse différentielle et ses contemporains reprochaient à Maillart le mépris pour les méthodes analytiques. Ils considéraient ses méthodes peu orthodoxes, faute de comprendre le contexte dans lequel il les employait[3,9].

Maillart a employé la statique graphique non seulement pour l'analyse mais également pour d'autres objectifs : la détermination des trajectoires d'effort pour matérialiser les structures

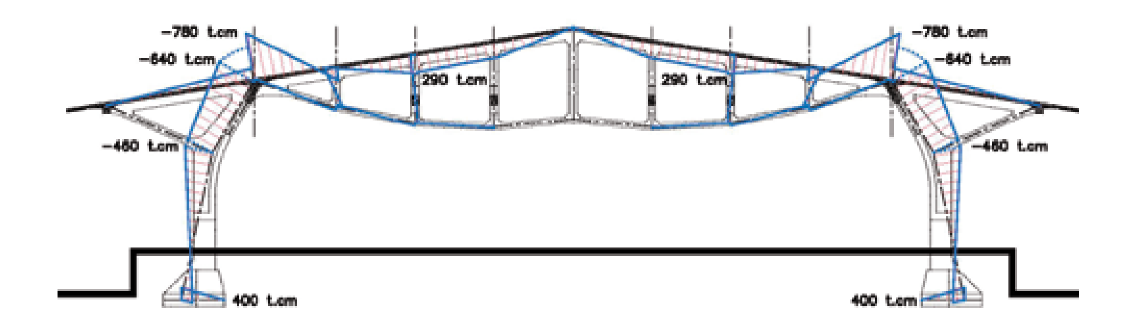



Figure 9: Moments fléchissants sur le hangar de Chiasso, 1923[27]

en béton (morphogenèse), pour corriger les géométries en cours de conception de manière à équilibrer les forces en présence (optimisation de la réponse structurale). Pour son hangar à Chiasso (Fig. 9), il n'est pas possible d'expliquer la géométrie sans la construction d'équilibres à l'aide de la statique graphique.[16]

Ce projet illustre le statut des matériaux et des parties constituant l'ouvrage :

- les membrures funiculaires où la quantité d'acier est juste suffisante pour reprendre les forces axiales en traction ;
- les colonnes de jonction entre les membrures où le ferraillage est juste technologique ;
- la membrure supérieure en T concentre à la fois toute la rigidité flexionnelle et la majeure partie de l'acier de ferraillage.[5]

Faisant usage de simulations numériques pour évaluer la qualité de la réponse structurale, on montre qu'il y a un comportement identique à celui qui est prévu par la simulation en statique graphique et que le comportement en flexion est cohérent avec celui de structures raidies. Ceci correspond effectivement à la méthode employée pour concevoir cette structure, qui n'est autre qu'une variation complexe d'arcs raidis intégrant les principes des dalles-champignons !

Les corrections à appliquer à la géométrie pour s'assurer que toute force de flexion a été éliminée montrent un maximum de 5 cm, correspondant à 1 mm sur l'épure tracée au 1/20ème, ce qui est géométriquement impraticable.[5]

Ce qui signifie que la conception de cette structure peut être considérée comme parfaite ... même basée sur un schéma statique qui n'est pas parfaitement équilibré.

## CONCLUSION

En résumé, notre propos a passé en revue l'approche de Maillart pour aborder la question structurale : une réflexion de fond préalable sur les comportements structuraux adéquats, le statut des matériaux et des parties composant l'ouvrage, l'emploi de la statique graphique pour organiser les trajectoires d'effort, obtenir les géométries des ouvrages et étudier l'amplitude des forces le long de ces trajectoires.

On peut aussi relever le parallèle des méthodes employées par Maillart pour gérer l'équilibre structural à l'échelle de la structure avec la méthode qui est employée aujourd'hui en conception plastique pour gérer les zones où les hypothèses de Bernoulli ne s'appliquent pas : la méthode des bielles et tirants[17, 18].

Nous avons conclu que l'approche de Maillart est en premier ressort une approche simplificatrice portée par la graphique. Pour Maillart, le béton est employé comme un matériau destiné à être comprimé. C'est grâce à cette conception qu'une grande efficacité structurale est atteinte, avec peu de fissuration et dès lors un endommagement réduit au cours du temps. En d'autres termes, une conception rationnelle et durable.

# APPORTS DE LA PRÉCONTRAINTE DANS L'ARCHITECTURE DES PONTS

**Jean-Marie Crémer**

## FREYSSINET ET SON IDÉE DE LA PRÉCONTRAINTE

L'objectif de Freyssinet, dès 1928, est de supprimer le caractère hybride du béton armé en inventant un procédé inédit permettant au matériau « béton » d'absorber seul les diverses contraintes. Pour ce faire, Freyssinet a l'intuition qu'il suffit de comprimer le béton dès sa mise en œuvre, c'est-à-dire le « pré-contraindre », de sorte qu'il puisse absorber les efforts de traction.

Freyssinet dépose en 1928 son brevet fondateur du béton précontraint où il utilise des fils en acier à très haute résistance. Son système d'ancrage de post-tension fut breveté dès 1939.

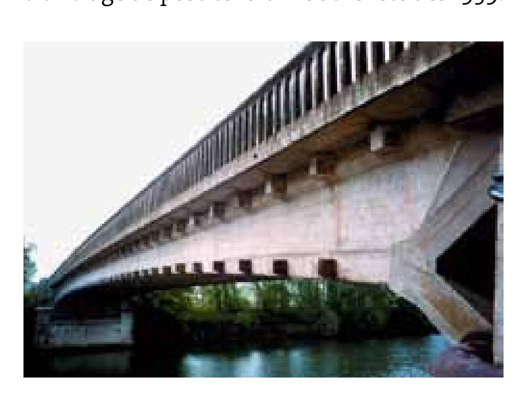


Figure 1 : Le pont de Lusancy sur la Marne (1941, 1946)[1]

Parmi les très nombreux ouvrages qu'il conçoit à partir de 1935, le pont de Luzancy (1941-1946), sur la Marne (Fig. 1), s'illustre sans conteste comme son premier chef-d'œuvre en matière de ponts. L'intérêt historique de l'ouvrage concerne essentiellement son concept constructif révolutionnaire et sa dimension esthétique inédite.

## UNE NOUVELLE ESTHÉTIQUE DES PONTS

Ce pont inaugure une esthétique neuve, propre à la nouvelle technique. Abolissant la distinction traditionnelle entre arches et tablier, l'ouvrage franchit la Marne à l'instar d'une structure plane. Il paraît simplement prolonger la route dont la chaussée traverserait la rivière, comme sans effort. La suppression de tout contact entre l'ouvrage plat et l'eau, la pureté des lignes structurales libèrent une impression sans précédent de légèreté. Celui-ci ne repose plus seulement sur les principes de masse et de gravité, impliquant une distribution verticale des forces, mais sur l'idée de performance qui génère une distribution principalement horizontale et non plus verticale des principales contraintes.

## UNE RÉVOLUTION DANS L'ART DE CONSTRUIRE

Innovation constructive majeure, la précontrainte a bouleversé l'art de construire du 20ème siècle, particulièrement dans le domaine des ouvrages d'art.

En Belgique, Gustave Magnel (1889-1955), fervent partisan de la précontrainte, va, en plus de ses recherches théoriques, inventer son propre système. Le pont de Sclayn sur la Meuse, construit en 1949 selon les principes qu'il inspire en Belgique, avec deux travées de 68 m, est le premier pont continu précontraint au monde.
Les ingénieurs allemands ont apporté une contribution importante et c'est en Allemagne qu'est construit le premier pont en porte-à-faux, dit en encorbellement, en béton précontraint avec voussoirs coulés en place (1950). La construction en encorbellement consiste à construire le tablier d'un pont à l'avancement par tranches successives, en faisant supporter par la partie déjà construite le poids propre de la tranche suivante (Fig. 2).

La forme naturelle de la poutre s'impose à l'ingénieur. En effet, les sollicitations

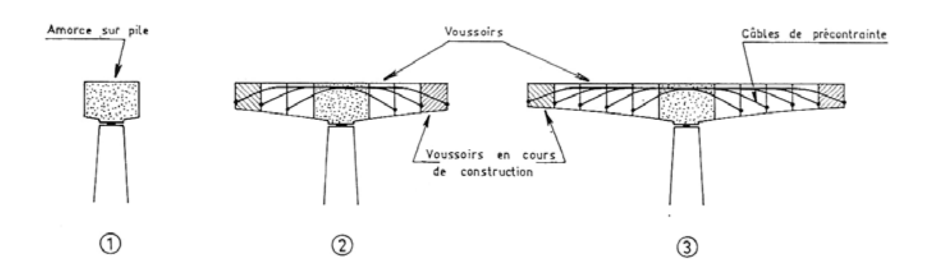



Figure 2 : Construction en encorbellement[2]



Figure 3 : Pont de Stolma (Norvège, 1998)[3]

principales auxquelles devra résister l'ouvrage sont dues à son propre poids. Comme le pont est construit en porte-à-faux, le diagramme de sollicitations de flexion approche une forme en parabole dont la valeur est nulle à l'extrémité du fléau et maximale au droit de l'appui sur pile. La structure sera donc optimale si sa forme (la hauteur de son tablier) est concordante avec celle du diagramme de moment de flexion et les grands ouvrages devront obligatoirement répondre à cette exigence, ce qui limite drastiquement les possibilités de création de forme dans ce type d'ouvrage.

La construction en encorbellement est la méthode d'exécution qui permet de franchir les plus grandes portées. Cette méthode lente et coûteuse a permis de réaliser des portées de plus de 300 m (Fig. 3). En Belgique, l'ouvrage le plus remarquable à ce point de vue est, avec une portée de 130 m, le viaduc de Huccorgne sur l'autoroute E42 Liège-Namur (1968-1971).

## L'ÉVOLUTION DES ANNÉES 1970.

Pour s'affranchir des inconvénients de cette méthode de construction en encorbellement, les ingénieurs allemands ont mis au point de nouveaux outils de construction permettant d'améliorer la vitesse d'exécution. La méthode la plus performante pour des portées entre 50 et 100 m est le poussage. Cette méthode, qui exige un tablier de hauteur constante, a été utilisée pour la réalisation en 1983 du viaduc de Steinebruck sur l'autoroute A27 avec une portée principale de 104,40 m (Fig. 4).

Le poids de l'ouvrage, environ 23 000 tonnes, en a fait à cette époque le record mondial de la méthode. Cet ouvrage aux lignes simples s'intègre bien dans le paysage de la vallée de l'Our, frontière entre la Belgique et l'Allemagne.

Une autre évolution technologique va avoir une influence sur le type de pont construit en béton précontraint. Jusqu'aux années 1980, l'acier de précontrainte est principalement utilisé sous forme d'un groupement de fils ou de torons protégés dans une gaine métallique injectée au coulis de ciment. La qualité de cette injection ayant souvent fait défaut, de très nombreux désordres dus à la corrosion des câbles par l'eau sont apparus, à tel point qu'une méfiance s'est installée chez les propriétaires de ces ouvrages en béton précontraint avec pour conséquence des restrictions sévères, spécialement dans les ouvrages de retenue d'eau.



Figure 4 : Viaduc de Steinebruck (Belgique, 1983)[4]



Figure 5 : Pont-canal de Houdeng (Belgique, 1998-2002)[5]

Au cours des années 1980, les producteurs des systèmes de précontrainte ont mis sur le marché des torons pré-protégés individuellement par une gaine en PEHD (Polyéthylène haute densité) remplie de graisse ou de cire pétrolière, torons gainés graissés ou gainés cirés, ce qui procure une nouvelle sécurité vis-à-vis de la corrosion et a permis d'utiliser, de nouveau, la post-tension extérieure, c'est-à-dire non noyée dans le béton.

Cette avancée technologique a également permis d'envisager sereinement l'utilisation de post-tension dans les ouvrages de retenue, d'autant plus qu'en cas de défaut, les torons défectueux peuvent être remplacés.

Le pont-canal de Houdeng (1998-2002) en Belgique est une application récente qui démontre bien l'apport et les nouvelles capacités de la post-tension dans ce type d'ouvrage très particulier. Ce pont permet à un canal fluvial de 35 m de large et 4 m de hauteur d'eau de franchir une vallée sur une distance de 500 m avec des appuis tous les 36 m (Fig. 5). Constitué d'une « auge » d'une hauteur totale de 7 m réalisée entièrement en béton, cet ouvrage utilise la post-tension par torons « gainés cirés » tant dans le sens longitudinal que transversal, ce qui assure une compression dans les deux directions et procure une étanchéité parfaite des parois de béton. De plus, l'utilisation d'une post-tension adaptée spécifiquement à la méthode de construction a permis de réaliser la structure à une extrémité du site et à la mettre en place par une opération de ripage longitudinal par poussage dont la masse (65 000 tonnes) mise en mouvement à cette occasion lui vaut de détenir le record du monde de la méthode.

La grande innovation va se produire en France au milieu des années 70.

La construction du pont de Brotonne en 1974 (Fig. 6), premier grand pont haubané en béton précontraint, va sonner le glas, du moins pour des portées supérieures à 200 m, de ces ouvrages de type poutre construits en encorbellement. C'est essentiellement le développement des moyens de calculs informatiques qui sont à la base de ce renouveau. Les ponts haubanés dont le dimensionnement est très complexe, particulièrement pour les ouvrages en béton, demandent des capacités de calcul énormes qui n'ont été accessibles qu'à partir des années 70. L'utilisation des haubans va permettre la construction de ponts en béton de grande portée en conservant des hauteurs de poutre de tablier de 3 à 4 m et d'augmenter considérablement l'élancement et la légèreté d'aspects des ouvrages en béton.

En Belgique, l'ouvrage le plus représentatif de cette évolution est le pont de Lanaye sur le canal Albert (Fig. 7) construit en 1985 dont le tablier est deux fois plus mince que celui de Brotonne.

Sans rechercher une minceur aussi affirmée qu'à Lanaye, le pont de Wandre (Fig. 8) franchit la Meuse et le canal Albert en combinant les avantages des trois améliorations décrites ci-dessus. Pont haubané en béton précontraint par post-tension, avec de la précontrainte remplaçable, il a été mis en place par poussage. La pureté de son dessin, la qualité

Figure 6 : Pont de Brotonne (France, 1974-1977)[6]



Figure 7 : Pont de Lanaye (Belgique, 1985)[7]





Figure 8 : Pont de Wandre (Belgique, 1984-1989)[8]

des matériaux mis en œuvre, le traitement des parements de béton et l'originalité de sa mise en lumière l'ont fait reprendre au Patrimoine exceptionnel de Wallonie.

## ARCHITECTURE DES PONTS ET PRÉCONTRAINTE

Dans le domaine des ponts, excepté pour des ouvrages de faible portée, le concepteur ne peut pas s'affranchir de la rigueur structurale qui reste la base et qui seule peut générer les formes.

La doctrine fonctionnaliste et rationaliste conserve tous ses droits. Dans des petits ouvrages, une certaine « fantaisie » peut être apportée, tout en étant très limitée. La « fantaisie » la plus usuelle et qui permet cependant de réaliser des ouvrages d'une certaine ampleur, consiste à conserver sur toute la longueur de l'ouvrage une hauteur de poutre de tablier constante. Cette seule dérogation à la dictature de la forme optimale peut raisonnablement être envisagée jusqu'à des portées de 100 à 120 m.

Dans les grands ouvrages, la charge de poids propre est tellement importante que l'objectif premier du concepteur doit être d'optimiser au mieux la forme en vue d'en limiter l'incidence. La seule solution est de donner à la poutre la forme la plus proche du diagramme des moments de flexion, ce qui anéantit toute velléité de formalisme non structural et explique la pauvreté architecturale des grands ponts de type poutre en béton précontraint.

Au cours des décennies précédentes, quelques tentatives d'allègement des tabliers ont été faites.

En général, elles visent à diminuer le poids des ouvrages en allégeant les âmes des poutres ou caissons ou en les remplaçant par des éléments métalliques. Ces interventions sont très coûteuses et ont généré peu de réalisations. Cependant certains de ces ouvrages sont remarquables et produisent une réelle impression de légèreté et d'élégance, comme le pont du Bras de la Plaine sur l'Île de la Réunion (Fig. 9).

Comme dit plus haut, c'est le développent des moyens informatiques qui a permis aux ouvrages en béton précontraint de s'affranchir partiellement de ces exigences en donnant aux ingénieurs les moyens de concevoir des ponts haubanés, ouvrages où les câbles de précontrainte sortent de la poutre en béton pour en augmenter le bras de levier et ainsi en démultiplier l'efficacité.

L'histoire des ponts haubanés en béton a commencé au milieu des années septante avec le pont de Brotonne en France et se poursuit toujours avec des réalisations d'une architecture de qualité et une variété beaucoup plus grande. Le record actuel de portée pour les ponts en béton est de 530 m et est détenue par le Skamsund bridge (1991), pont haubané en Norvège.



Figure 9 : Pont Bras de la Plaine (Réunion, 2001)[9]

# POINTS FAIBLES ET PATHOLOGIES DES PONTS EN BÉTON PRÉCONTRAINT

**Philippe Demars**

## PRÉCONTRAINTE PAR PRÉ-TENSION

Les ouvrages en béton précontraint par pré-tension sont souvent constitués de poutres préfabriquées, garantie de durabilité. On n'y rencontre que peu de problèmes spécifiques à la précontrainte. Des problèmes existent, mais ils sont ceux que l'on peut rencontrer dans toutes les structures en béton. Ils sont traités de la même manière que toutes les structures en béton.

## PRÉCONTRAINTE PAR POST-TENSION EXTERNE AU BÉTON DANS LES OUVRAGES ANCIENS

Il s'agit d'ouvrages des années 1950-1960. La précontrainte est généralement constituée de fils de 7 mm de diamètre dont la protection était simplement assurée par un mortier de ciment, non gainé.

D'une manière générale, le mortier d'enrobage des fils de post-tension de ces ponts est carbonaté à cœur. La raison en est que, ne disposant pas à l'époque d'adjuvants fluidifiants, on était obligé d'utiliser de l'eau en excès pour que le mortier enrobe correctement les fils.

On constate souvent une mauvaise prise en compte de l'environnement de cette précontrainte. Par exemple, placement des câbles sous un avaloir ou un trapillon ou création de pièges à eau et y loger des câbles, etc.

Il est également fréquent de déplorer des défauts d'exécution, comme une mauvaise injection des abouts (Fig. 1), une mauvaise réparation des orifices pratiqués dans le tablier en cours de chantier, couplée avec une défectuosité de l'étanchéité, etc.

Les éléments précités, couplés à des défauts d'étanchéité, provoquent la corrosion des câbles (Fig. 2).

Dans certaines conditions, il peut y avoir rupture fragile des câbles. Ce phénomène est beaucoup plus rare que la corrosion, mais il est beaucoup plus préoccupant dans la mesure où il ne s'accompagne d'aucun signe annonciateur. De plus, il constitue un danger certain pour les intervenants sur les câbles.

## PRÉCONTRAINTE PAR POST-TENSION EXTERNE AU BÉTON DANS LES OUVRAGES RÉCENTS

Ce type de précontrainte diffère de l'ancien système par les éléments suivants :

- les torons remplacent les fils (souvent de type gainés graissés) ;
- la protection des aciers est assurée par une gaine, soit par toron, soit par câble, soit les deux ;
- la gaine des câbles est réalisée en matériau durable et étanche (polyéthylène haute densité) ;
- les produits d'injections sont devenus performants (coulis de ciment adjuvantés, graisse ou cire pétrolière, époxy-brai...).

À titre d'exemple, mentionnons le cas d'un pont cantilever construit en 1951 avec précontrainte externe par post-tension, ancien système :

- en 1986, mise à jour d'une grave corrosion des câbles ;

Figure 1 : Défaut d'injection d'un about[1]



Figure 2 : Corrosion avancée d'un câble[2]

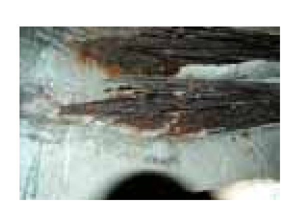


Figure 3 : Faciès en escalier des ruptures[3]



- en 1990, remplacement de tous les câbles par des torons gainés graissés, solution jugée par tous comme la plus durable ;
- en 2005, constatation de la rupture de torons.

Les sections de rupture présentent un faciès inhabituel en escalier (Fig. 3). Elles sont exemptes de rouille. L'expertise va montrer que des capots d'ancrage dans les becs cantilever étaient pleins d'eau alors qu'ils auraient dû être remplis de cire pétrolière (défaut d'exécution).

Les différents essais réalisés sur les câbles n'ont détecté aucune anomalie. Après de nombreuses recherches, on a pu avancer que les ruptures avaient été provoquées par une corrosion fissurante sous tension, phénomène rare et complexe combinant haut niveau de contrainte, confinement et présence d'eau. Cela signifie que même les solutions jugées les plus efficaces ne sont pas à l'abri de problèmes, tout particulièrement si l'exécution n'a pas été réalisée avec tout le soin requis.

## PRÉCONTRAINTE PAR POST-TENSION INTERNE AU BÉTON

Il s'agit du type de précontrainte pour lequel on rencontre le plus souvent des problèmes de corrosion. Les raisons en sont :

- la défectuosité de la chape d'étanchéité ;
- l'existence d'ancrages de câbles en chaussée ;
- la défectuosité de l'injection de la gaine des câbles.

Ces problèmes ont été rencontrés par exemple sur un viaduc autoroutier de près de 600 m de long. La précontrainte des poutres est assurée par des torons (précontrainte par pré-tension) et par des câbles, constitués de fils logés dans des gaines métalliques (précontrainte par post-tension). Une précontrainte transversale est également présente dans les entretoises et dans la dalle de tablier.

L'ouvrage a été construit en 1960. En 1997, son inspection a mis en évidence la présence de fissures suivant le tracé des câbles de précontrainte par post-tension dans la majorité des poutres de rive.

Leur dégagement a permis de découvrir des câbles fortement corrodés (plus de gaine ni de coulis d'injection et par endroits, les torons n'étaient plus qu'un amas de rouille). L'eau y a pénétré par les ancrages situés en face supérieure du tablier. De ces câbles l'eau a ensuite migré vers les câbles ancrés dans les abouts via les défauts du béton.

À ce problème s'ajoute celui des câbles de précontrainte par post-tension souvent corrodés, voir rompus, sous les filets d'eau.

## CONCLUSION

La précontrainte par post-tension a permis de réaliser d'audacieuses structures en béton. Mais celles-ci sont fort sensibles aux dégradations des câbles, généralement suite aux infiltrations d'eau.

Les problèmes sont rarement le fait d'erreurs de dimensionnement mais ils trouvent le plus souvent leurs origines dans :

- des erreurs de conception (mauvaise prise en compte de l'environnement des câbles) ;
- des erreurs d'exécution (culture d'entreprise non adéquate de certaines sociétés) ;
- des défauts d'entretien.

Les problèmes sont plus fréquents dans les ouvrages anciens que dans les nouveaux. Néanmoins, on n'est pas à l'abri de pathologies nouvelles ou rares.

## REMPLACEMENT DE LA PRÉCONTRAINTE EXTÉRIEURE DANS UN PONT EN CAISSON

**Yves Rammer**

### BRÈVE HISTOIRE DE LA CONCEPTION DE L'OUVRAGE

Le pont SNCB de Clabecq est situé sur le canal modernisé de Bruxelles à Charleroi. Il a été construit en 1960 par l'entreprise CFE sous la direction de l'ingénieur J.M. Pappaert. Sa portée est de 60,26 m et le tablier est constitué d'un caisson trapézoïdal de 4 m de hauteur (Fig. 1). Le système de précontrainte choisi a été une des dernières applications du « Câble Sandwich » développé par l'entreprise Blaton-Aubert[7] durant la Seconde Guerre mondiale. Malgré sa première mondiale au pont de la rue du Miroir (Bruxelles) en 1942, la SNCB n'a pris le parti de réaliser des tabliers de ponts-rails en béton précontraint par post-tension que très tardivement (1959) moyennant de sévères impositions concernant le niveau de contraintes à respecter (précontrainte totale sans décompression : minimum 0,5 MPa et maximum 16 MPa). C'est le deuxième pont-rail SNCB (avec le pont de Chercq) en béton précontraint de cette importance exécuté en Belgique[1].

L'application du système Blaton-Magnel implique la mise en œuvre de dispositifs technologiques complexes (grilles de classement, peignes, déviateurs). Un soin tout particulier a été apporté aux gaines métalliques nervurées (ép. 0,6 mm) constituant coffrage perdu pour le passage légèrement divergent des câbles dans les blocs d'about. La mise en précontrainte progressive a débuté en décembre 1960 et duré 3 mois. Les câbles (au nombre de 30) comprennent chacun 72 fils de ∅7 mm introduisant à la mise en tension une force d'environ 80 MN avant pertes. Ils sont externes à la structure (c'est-à-dire que les câbles sont apparents dans le caisson) et protégés contre la corrosion par un cimentage. Le tracé des câbles proposé est brisé au droit du diaphragme central et aux deux diaphragmes situés près des appuis nécessitant ainsi de renforcer assez fortement les trois voiles transversaux (épaisseur 45 cm) où sont concentrés les déviations et les efforts verticaux[2].

### ÉTAPES DE LA RÉNOVATION DU PONT

Les inspections de contrôle ont révélé à la fin des années 1990 une corrosion généralisée et évolutive des fils pouvant mettre la sécurité du pont en danger dans un futur proche. La SNCB a donc décidé de procéder au remplacement de toute la précontrainte existante.

Les auteurs du projet de rénovation[6] ont calculé les efforts de l'époque avec les connaissances d'aujourd'hui. L'effort de précontrainte à long terme recalculé revient ainsi à 55,8 MN, qui est à comparer avec la prévision SNCB de l'époque à 67 MN, soit une différence de 16 %. Les contraintes dans le béton ont été calculées avec la formule de la flexion composée classique (effort normal + moment de flexion). Sous convoi Union Internationale des Chemins de Fer (U.I.C.) et charges permanentes, une compression en fibre supérieure de 14,2 MPa et une traction en fibre inférieure de 1,8 MPa se développent. On peut en déduire que le manque de connaissances scientifiques concernait principalement les pertes différées par retrait et fluage du béton et celles dues à relaxation de l'acier.

Les 24 nouveaux câbles composés de 15 torons T15S (∅15,7 mm et 150 mm², livrés par Freyssinet) gainés et graissés sont logés dans des tubes en PEHD (Polyéthylène haute densité) de ∅125/3,9 mm. L'espace entre les torons gainés graissés et la gaine PEHD est injecté par

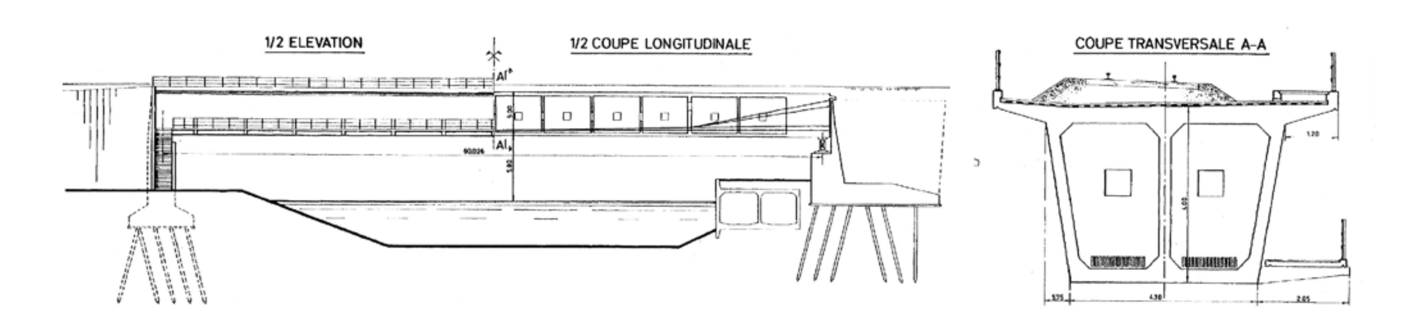



Figure 1 : Plans de l'ouvrage : élévations[1] et coupe[2]

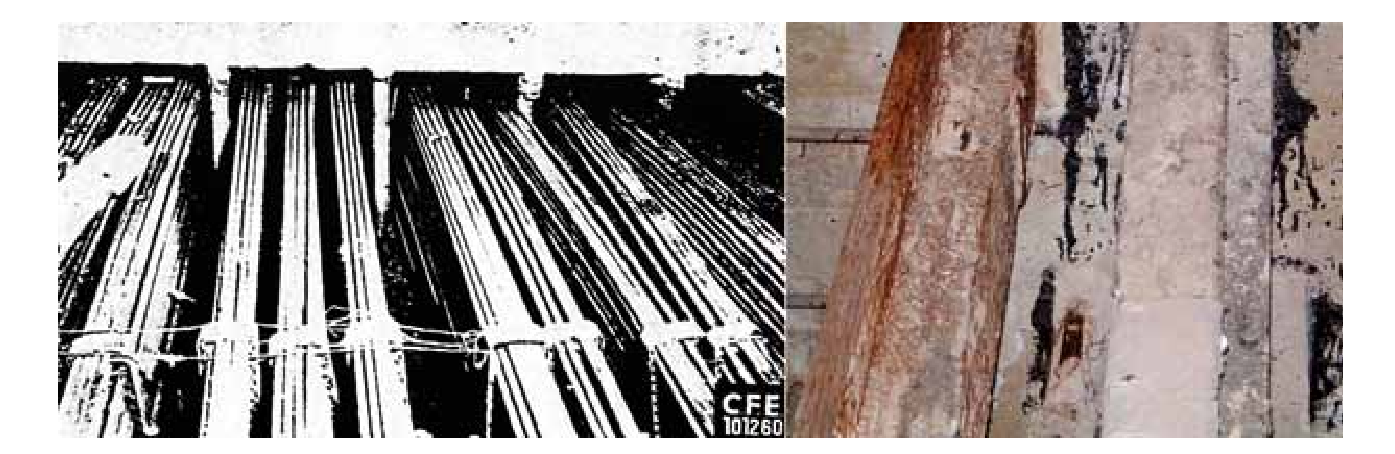



Figure 2 : Câbles Blaton-Magnel[2] et corrosion[4]

un coulis de ciment préalablement à la mise en tension. Ce type de câbles permet le remplacement éventuel d'un toron. Des nouveaux blocs d'about de 120 cm d'épaisseur ont été réalisés avec en empreinte les logements d'appuis (par groupe de trois câbles, avec les inclinaisons requises) pour les plaques d'ancrage en acier (340 mm de côté et de 80 mm d'épaisseur, percé d'un trou ∅125 mm).

Les entretoises (diaphragmes) qui supportent les déviateurs sont maintenues dans leur fonction et épaissies de manière à loger les nouveaux déviateurs constitués de tubes courbés en acier. Les passages des nouveaux câbles dans les abouts sont forés en ∅142 mm sur une longueur d'environ 5 m. Des tubes prolongateurs ∅133/4 mm sont introduits dans les forages et le vide entre les forages et les tubes en acier sont injectés. Les câbles sont ensuite mis en place dans les gaines. Les blocs d'ancrages sont placés sur les plaques d'appuis avec les clavettes ; les câbles sont ensuite mis en tension. L'effort total au vérin est calculé à 80 % de la contrainte de rupture garantie (1 860 MPa), soit 80,4 MN. L'étude de l'ouvrage supposait la réalisation d'une force de précontrainte totale de minimum 75,3 MN dans la section à mi-portée, après blocage de tous les ancrages et pertes par frottement.
Le phasage est résumé en figure 3 : les files verticales d'anciens câbles sont remplacées une à une et alternativement dans chaque alvéole du caisson.

Après dégagement des anciennes « culasses », les nouveaux blocs d'about ont été ferraillés (barres de ∅32 mm), coffrés et bétonnés. Ensuite la carotteuse est positionnée sur un échafaudage avec matérialisation des axes de forage. Parallèlement au travail à l'extérieur, le bétonnage des renforcements des diaphragmes de déviations (passage de 45 cm à 75 cm d'épaisseur) est réalisé, ainsi que la percée des autres diaphragmes. Les carottes sont extraites par morceaux successifs. Les nouvelles plaques d'appuis sont posées dans les logements inclinés réservés dans le coffrage, ainsi que les tubes prolongateurs ; après quoi, le vide annulaire entourant les tubes est injecté. Les gaines PEHD sont posées, ainsi que les déviateurs dans les trois diaphragmes épaissis. Les nouveaux torons gainés et graissés sont introduits dans les tubes. Après vérification de l'étanchéité des gaines, on procède à l'injection. Les mises en tension sont effectuées dans un environnement très confiné.

Figure 3 : Phasage du remplacement de la précontrainte[3]

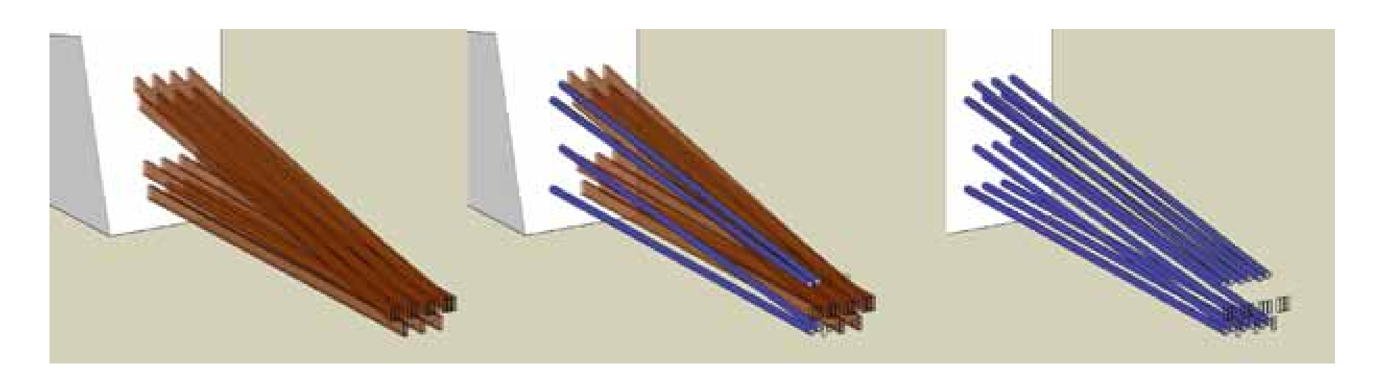







Figure 4 : Photos du chantier[4]

Enfin, les torons sont recoupés avec une longueur résiduelle suffisante pour permettre de replacer un vérin pour reprise éventuelle de tension et les têtes sont protégées par un capotage injecté de graisse.

## PARTICULARITÉS DE CE CHANTIER DÉLICAT

Sur les 48 forages en ∅142 mm au travers des blocs d'about (5,2 m), douze forages ont connu des aléas retardant le chantier. Il s'agit principalement des lits de câbles dont on peut constater sur le plan d'implantation la grande proximité avec les anciens câbles. Il en a résulté des entortillements de câbles, des interceptions soit de gaines en acier soit également d'anciens blocs d'ancrage « Sandwich » provoquant des blocages de carottier. Il a donc été nécessaire de faire preuve d'une grande imagination pour tenter de déloger les morceaux de carottes bloquées. Un autre incident a eu lieu lorsque quelques forages ont endommagé le ferraillage des nouveaux blocs d'about en raison de la précision insuffisante des forages. Sur 5 m de longueur, la position moyenne des carottages s'écarte de la position théorique de 4 mm sur l'axe horizontal et 32 mm sur l'axe vertical. Cependant, la dispersion des écarts par rapport à la valeur moyenne est importante: en supposant une distribution normale, l'écart-type par rapport à la moyenne est de 37 mm selon l'axe horizontal et de 26 mm suivant l'axe vertical. La raison principale de ces incidents est la grande difficulté à mesurer la géométrie réelle de l'ouvrage après fluage et retrait et tenant compte de la précision de réalisation de l'époque. Des mesures topographiques ont été effectuées, montrant des déviations de l'ordre de 10 cm, ainsi qu'une importante contreflèche.

L'exécution des forages est donc une opération très délicate, et leur implantation réserve souvent quelques surprises malencontreuses[5]. L'utilisation de techniques d'investigations non-destructives ou de petits forages de reconnaissance et des techniques d'endoscopie doivent être maîtrisés et facilement disponibles. Le fait de remplacer la précontrainte câble par câble permet de s'affranchir d'une série de pertes de précontrainte et ainsi d'améliorer le « rendement » de la précontrainte : le raccourcissement en cours de mise en tension et les pertes différées par fluage et retrait sont quasi annulés ; la relaxation des aciers est plus faible compte tenu de la qualité des aciers modernes ; l'encombrement des nouveaux câbles est généralement plus faible.

## CONCLUSION

L'expérience de quatre ponts renforcés en Belgique (Chercq, Clabecq, Ittre et Sclayn) démontre qu'avec quelques précautions et une préparation sérieuse il est possible d'intervenir de manière économique sur des ouvrages précontraints coulés sur cintre dans les années 1950-1960. La solution par mono-torons gainés et graissés placés dans des conduits PEHD continus et enfilés dans les tubes métalliques coudés au droit des déviateurs permet, après injection de coulis, d'isoler les mono-torons et d'empêcher leur écrasement dans les déviations. Les techniques d'expertise actuelles laissent néanmoins une question essentielle en suspens : est-il possible d'estimer la précontrainte résiduelle ?

## PRÉCONTRAINTE ET CORROSION, QUE FAIRE ?

**Pierre-Marie Dubois**

### FRAGILISATION DES ACIERS DE PRÉCONTRAINTE EN COURS DE CORROSION

Des études montrent que les faciès de corrosion observés pour le cas de la corrosion sous contrainte sont très différents de ceux habituellement observés lors d'une corrosion classique par piqûre en raison d'une nette microfissuration et donc d'une fragilisation de l'acier en fond de piqûre.

Pour les anciennes poutres précontraintes, ce risque de fragilisation est cependant atténué par le fait que la tension effective de service des aciers a diminué de l'ordre de 15 à 20 % par rapport à la tension initiale de mise en précontrainte. Cette diminution de tension résulte principalement des effets du fluage du béton et de la relaxation des aciers. Cette réduction importante donne une « réserve » de tension qui sera « consommée » au fur et à mesure de la progression des corrosions.

### MESURE GÉNÉRALE DE BASE : ÉCARTER LES EAUX

Les agents corrodants tels que l'eau, l'air et les chlorures mettent parfois plus de trente années pour atteindre les aciers de précontrainte et initier les corrosions. Une fois les corrosions amorcées, si rien n'est fait, le phénomène devient évolutif sauf si l'on peut interrompre la source d'approvisionnement des agents corrodants, la première mesure étant d'écarter les introductions d'eau. Dans le cas des ponts, la première mesure sera donc toujours de compléter ou de remplacer les chapes d'étanchéité.

### CAS DE LA PRÉCONTRAINTE PAR POST-TENSION EXTERNE AU BÉTON

Les câbles de précontrainte sont généralement dans ce cas facilement accessibles. Ils peuvent donc souvent être remplacés par de nouveaux câbles.

### CAS DE LA PRÉCONTRAINTE PAR POST-TENSION INTERNE AU BÉTON

La précontrainte par post-tension interne au béton constitue le cas le plus fréquemment rencontré dans les ouvrages anciens. Le traitement du problème de la corrosion de ces câbles se heurte à de nombreuses difficultés. D'une part, ces câbles, noyés dans la masse de béton des poutres, s'avèrent peu accessibles et d'autre part, étant enfilés dans une gaine métallique, ils ne permettent pas d'envisager une quelconque intervention du type protection électrochimique. Dans le meilleur des cas, on arriverait à protéger la gaine métallique de la corrosion, ce qui est sans intérêt. On a alors imaginé de suivre une autre voie qui consiste à saturer le coulis de ciment d'injections de protection par un inhibiteur de corrosion et ensuite de réinjecter un micro-coulis de ciment pour combler les défauts d'injection trouvés.

### PRINCIPE GÉNÉRAL

Ce procédé est basé sur l'utilisation d'une pompe alternative qui se dilate et se contracte en créant des surpressions et des dépressions alternatives à la fréquence ultrasonore (Fig. 1).

Après perçage de l'enrobage de béton et de la gaine de confinement des câbles de précontrainte, la pompe à ultrasons injecte l'inhibiteur sous basse pression. L'action des ultrasons induit principalement un état de cavitation en phase vapeur du liquide inhibiteur. L'énergie ainsi libérée permet de dégager efficacement les entrées des macropores du coulis en contact avec le câble de précontrainte, favorisant ainsi la pénétration de la solution et l'imprégnation du milieu.

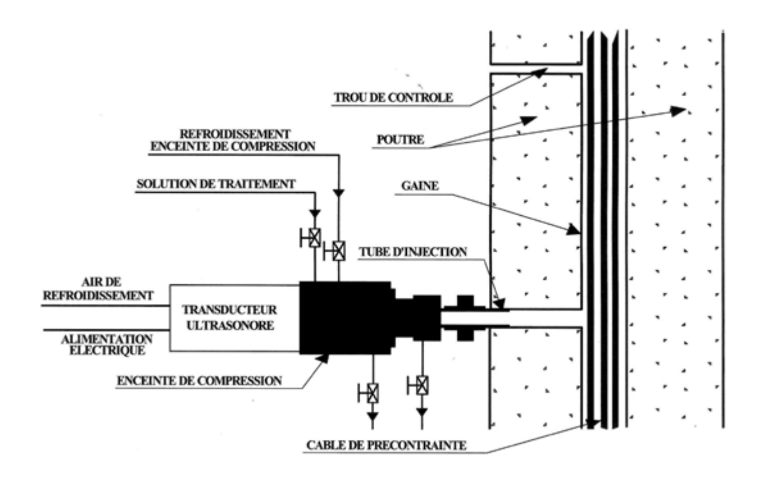



Figure 1 : Principe de fonctionnement général de la pompe à ultrasons[1]

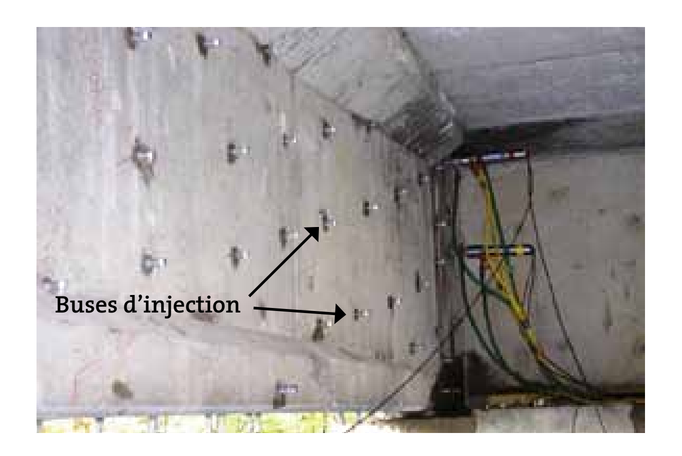



Figure 2 : Après perçage et mise en place des buses d'injection[2]



Figure 3 : Injection de la solution inhibitrice au moyen du transducteur ultrasonore[3]

## MISE EN ŒUVRE

**1ère étape : Placement des injecteurs**

Après localisation précise des câbles de précontrainte, des perçages de l'enrobage de béton sont pratiqués jusqu'au niveau des aciers. Ils sont réalisés à espacements réguliers, de l'ordre de 50 cm, le long de la gaine de précontrainte (Fig. 2). Une buse d'injection est placée au niveau de chacun de ces perçages.

**2ème étape : Injection de l'inhibiteur de corrosion**

Dans un deuxième temps, l'inhibiteur de corrosion est injecté au niveau de chaque buse à l'aide d'une pompe spécifique utilisant les ultrasons (Fig. 3). La progression de la solution inhibitrice à l'intérieur de la gaine est vérifiée au niveau des perçages réalisés de part et d'autre. Lorsque celle-ci apparaît dans les orifices voisins, l'injection est arrêtée et la pompe est transférée au point suivant.

Au cours du traitement, le temps de progression de l'inhibiteur est mesuré d'un perçage à l'autre. Une cartographie des temps de migration est alors obtenue, fournissant des informations sur la qualité de remplissage du coulis. Ainsi, un temps de migration important correspondra à un coulis compact avec peu de défauts. À contrario, un temps de migration très court permettra de détecter une zone peu remplie.

**3ème étape : Comblement des défauts du coulis**

Après injection de la solution inhibitrice et à partir de la cartographie précédemment obtenue, les buses sont réutilisées pour l'injection d'un micro-coulis à base de ciment.

Le procédé utilise une solution inhibitrice de nitrite de calcium dont l'efficacité, avec ou sans présence de chlorures, est démontrée par plusieurs travaux et par les résultats pratiques depuis près de 20 ans. En effet, le nitrite de calcium restaure la couche de passivation naturelle de l'acier dans un béton sain.

## RÉALISATIONS PRATIQUES

La plus ancienne application remonte à 1994. Une étude faite en 2012 a confirmé que la protection conférée par la méthode est pérenne.

## RÉFÉRENCES

**J.-M. Crémer - La passerelle Mativa à Liège - Patrimoine exceptionnel. 1905**

[1] Crédit photographique : Jean-Luc Deru / Daylight.
[2] Fonds Hennebique. CNAM/SIAF/CAPA/Archives d'architecture du 20ème siècle. BAH24190409868.
[3] Carte postale identique sur www.delcampe.be prix 3 €.
[4] (1905), Les ponts Hennebique, les 3 jumeaux, *Le Béton Armé*, 85.
[5] Demonceau, D. (2010). *Analyse critique et comparative d'un ouvrage historique: le Pont Mativa*. Travail de fin d'études (Master) - Sciences Appliquées, Construction à finalité approfondie - Université de Liège.

**D. Zastavni - La conception des ouvrages en béton armé au début du 20ème siècle : approches visionnaires de Robert Maillart. 1872-1940**

[1] Rigassi, C. ; Billington, D. (1988). Publikationen zu Robert Maillarts Leben und Werk. *Handschriften und Autographen der ETH-Bibliothek: Robert Maillart (1872-1940) Ingenieur*. Zurich.
[2] Bill, M. (1955). *Robert Maillart, Ponts et Constructions*. Girsberger
[3] Billington, D. P. (1979). *Robert Maillart's Bridges, The Art of Engineering*. Princeton University Press.
4 Culmann, K. (1866). *Die graphische Statik*. Zürich: Meyer und Zeller.
[5] Zastavni, D. (2007). *La Conception chez Robert Maillart: Morphogenèse des Structures Architecturales (PhD dissertation).* Louvain-la-Neuve : UCL.
[6] Simonnet, C. (2005). *Le béton, histoire d'un matériau*. Marseille: Éditions Parenthèses.
[7] Guidot, R. (1997). Béton armé. *L'art de l'ingénieur, Constructeur, entrepreneur, inventeur*. Paris.
[8] Chambre syndicale des constructeurs en ciment armé de France et de l'Union française (1949). 1849-1949, Cent ans de béton armé. *Revue Travaux* n°194bis : 34-41.
[9] Billington, D. P. (1997). *Robert Maillart, Builder, Designer, and Artist*. Cambridge University Press.
[10] Heyman, J. (1996). *Structural Analysis, A Historical Approach*. Cambridge University Press.
[11] Zastavni, D. (2011). Robert Maillart's Innovative use of Concrete. *DOCOMOMO Journal*, 45(2): 12-21.
[12] Heyman, J. (1995). *The Stone Skeleton: Structural Engineering of Masonry Architecture*. Cambridge University Press.
[13] Ochsendorf, J. (*2005*). Practice before Theory: The Use of the Lower Bound Theorem in Structural Design from 1850-1950. *Essays: The History of the Theory of Structures*. Madrid: 353-366.
[14] Ritter, W. (*1897*). Versteifungsfachwerke bei Bogen- und Hängebrücken. *Zeitschrift für Bauwesen, 27: 187-207.*
[15] Zastavni, D. (2009). What was truly innovative about Maillart's designs using reinforced concrete? *Proceedings of the Third International Congress on Construction History.* Cottbus.
[16] Zastavni, D. (2008). The structural design of Maillart's Chiasso Shed (1924): a graphic procedure. *Structural Engineering International*, 18(3): 247-252.
[17] Schlaich, J. & Schäfer, K. (1991). Design and detailing of structural concrete using strut-and-tie models. *The Structural Engineer,* 69 (6): 113-125.
[18] Schlaich, J., Schäfer, K. & Jennewein, M. (1987). Toward a Consistent Design of Structural Concrete. *PCI Journal*, Special report, May-June 1987: 74-150.
[19] Losinger and Co., Bern *in* Billington, D.P. (1997). *Robert Maillart, Builder, Designer, and Artist*. Cambridge University Press, p. 180.
[20] J. Solca (1914), Schweizerische Bauzeitung 63 (24), fig. 3.
[21] Crédit photographique : D. Zastavni, photo de 2010.
[22, 23, 24, 25] Crédits photographiques : D. Zastavni
[26] Crédit photographique : D. Zastavni, photo de 2010.
[27] Crédit photographique : D. Zastavni

**J.-M. Crémer - Apports de la précontrainte dans l'architecture des ponts**

[1] Crédit photographique : efreyssinet-association.com
[2] Mathivat J. et Virlogeux M. (1979), *Les grands ouvrages en béton précontraint.* AFPC, Bulletin technique.
[3] Crédit photographique : http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stolmabrua01.JPG
[4,5] Crédits photographiques : Jean-Luc Deru / Daylight.
[6] Crédit photographique : Jean-Marie Crémer.
[7,8] Crédits photographiques : Jean-Luc Deru / Daylight.
[9] La Réunion. Guide Touristique île de la Réunion avec Mi-aime-a-ou.com
[10] Frampton K. (1980). *Thames & Hudson, l'Architecture moderne, une histoire critique*.
[11] Mathivat J. (1978). *Construction en encorbellement des ponts en béton précontraint*. Paris : Eyrolles.
[12] Menn C. (1990). Birkhäuser Verlag, *Prestressed Concrete Bridges*, Basel-Boston-Berlin.

**Ph. Demars - Points faibles et pathologies des ponts en béton précontraint**

[1, 2, 3] Crédits photographiques : SPW.

**Y. Rammer - Remplacement de la précontrainte extérieure dans un pont en caisson**

[1] Soete, A. (1964). Les ouvrages en béton précontraint aux chemins de fer. *Mémoires du CERES*, Liège.
[2] Pappaert, J.-M. (1960). Quelques constructions en béton précontraint exécutées en Belgique de 1959 à 1961. *Précontrainte,* n°16, pp. 59-104.
[3] Crédit photographique : Yves Rammer
[4] Crédit photographique : Pierre-Marie Dubois
[5] Calgaro, J.-A. (1997). *Maintenance et réparation des ponts*. Paris : Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussée.
[6] Dubois, P.-M. (2001). *Rapport relatif aux essais de mesure de précontrainte résiduelle du pont de Clabecq, annexe n°3* Note de calcul établie par ir R. Dekeyser. Rapport confidentiel.
[7] Magnel, G. (1953). *Le béton précontraint.* 3ème édition. Gand : Éd. Fecheyr

**P.-M. Dubois - Précontrainte et corrosion, que faire ?**

[1, 2, 3] Crédits photographiques : Pierre-Marie Dubois
[4] Dubois, P-M., Michaux, D., (2008). Technique innovante : traitement des câbles de précontrainte par injection d'un inhibiteur de corrosion, *Ouvrages d'art (SETRA)*, N°59, novembre 2008, pp. 8-18.

# 5. L'INDUSTRIALISATION DE LA CONSTRUCTION ET LA PRÉFABRICATION

Au cours du 20ème siècle, la construction s'est progressivement structurée pour faire face à une demande toujours plus importante. Ce chapitre illustre deux vagues d'industrialisations nées des demandes de reconstruction consécutives aux deux guerres mondiales. La première concerne l'utilisation du béton maigre dans le logement social dans les années 1920. La seconde donnera naissance à la préfabrication aujourd'hui omniprésente en construction. Les articles qui suivent mettent en évidence le rôle et le dynamisme du secteur de la construction et des pouvoirs publics dans ces évolutions. Alliant économie et qualité architecturale, la préfabrication a permis la réalisation d'ouvrages qui font aujourd'hui partie de notre patrimoine culturel immobilier tel *Ieder zijn huis* illustré en fin de chapitre. Elle a également donné naissance au béton architectonique dont il sera question au chapitre 7.

## LE BÉTON MAIGRE DANS LE LOGEMENT SOCIAL APRÈS LA PREMIÈRE GUERRE MONDIALE. EXPÉRIENCES, INNOVATIONS, HÉSITATIONS

**Stephanie Van de Voorde**

L'utilisation expérimentale de « béton maigre » dans le logement social après la Première Guerre mondiale constitue un thème populaire dans l'historiographie de l'architecture belge. Pratiquement tous les aperçus historiques mentionnent les cités-jardins *Klein Rusland* à Zelzate (1920-23, arch. Huib Hoste) et La Cité Moderne à Berchem-Sainte-Agathe (1922-25, arch. Victor Bourgeois) (Fig. 1)[1].
La portée de ces études est toutefois souvent très limitée, ce qui conduit à une sous-estimation de la contribution des entrepreneurs et des constructeurs de systèmes. De plus, les projets moins célèbres, comme le chantier expérimental « la Roue » à Anderlecht, sont souvent laissés de côté. De tels projets remettent en question la dominance historiographique du système de construction monolithe « Non Plus », ce qui est également corroboré par des sources singulières telles que

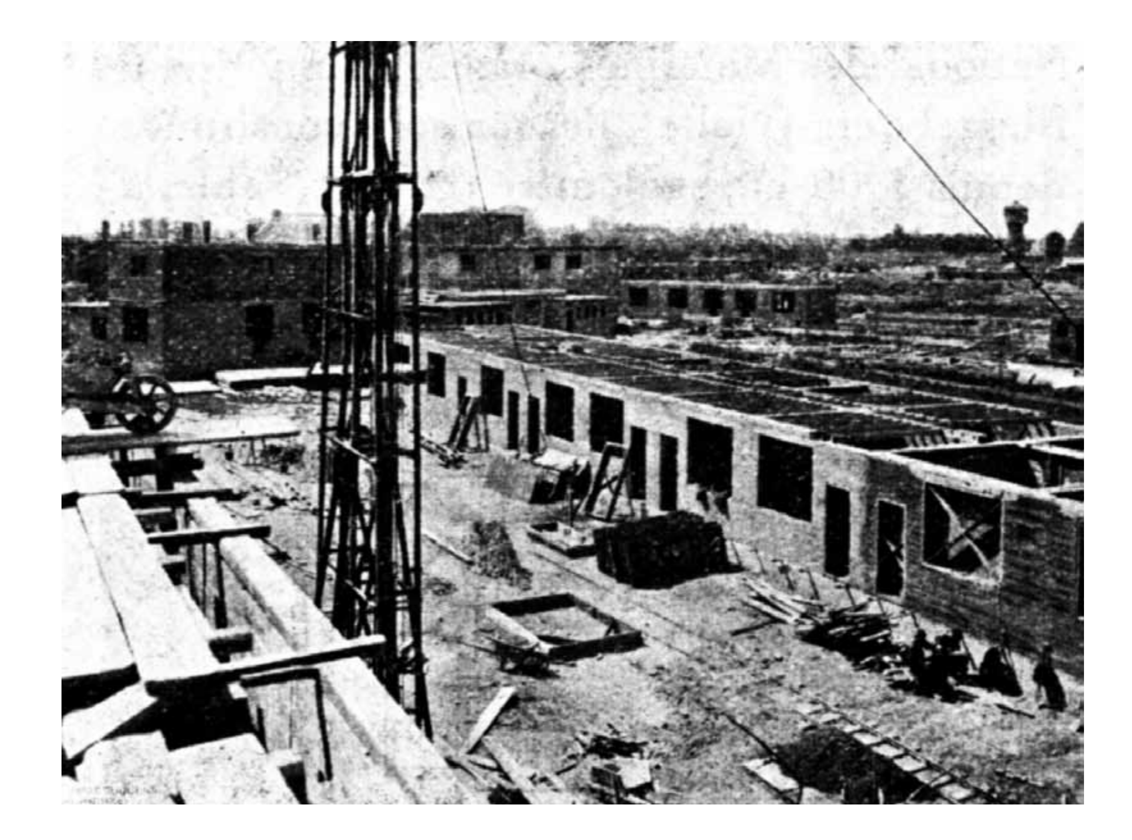


Figure 1 : Le système « Non Plus » à La Cité Moderne[1]

des brevets ou la « Revue du Béton Armé », qui montrent de nombreux systèmes de construction expérimentaux développés par des inventeurs et des entrepreneurs au début des années vingt.

Tenant compte de ces remarques, l'histoire des expériences avec le béton dans le logement social peut être considérée comme une histoire pluridisciplinaire qui s'est développée en phases, chaque phase reflétant la relation changeante entre les trois acteurs principaux, notamment les architectes, les maîtres d'ouvrage et les entrepreneurs.

Dans la première phase, de 1918 à 1920, les architectes et le gouvernement ouvrirent la marche. Les architectes considéraient la reconstruction d'après-guerre comme une opportunité pour mettre en pratique leurs idées modernistes. Les architectes comme Verwilghen, Eggericx, Van der Swaelmen et Hoste se retrouvèrent dans des nouvelles associations, telles que la Société Belge des Urbanistes et Architectes Modernistes (SBUAM) et l'Union des Villes et Communes belges. Ils organisèrent des conférences, firent des exposés et publièrent des revues, mais cela n'a pas suffi pour mettre en œuvre leurs nouvelles idées concernant les logements sociaux : pour des applications à grande échelle, ils dépendaient du gouvernement. Afin de résoudre l'énorme problème du logement, le gouvernement mit en place de nouvelles structures, par exemple la « Société nationale des habitations à bon marché » (SNHBM, 1919) et les architectes s'empressèrent d'intégrer ces nouvelles structures gouvernementales dans le but de réaliser leurs idées modernistes.

Figure 2 : Le système « Kent » à La Roue[2]



Même si le gouvernement n'était pas toujours d'accord avec leurs préoccupations esthétiques et sociales, leurs idées furent suivies car elles étaient aussi économiques. Pour l'élaboration pratique et matérielle, il était cependant nécessaire de développer la relation avec le troisième acteur, l'industrie de la construction. Immédiatement après la guerre, l'industrie de la construction alternative était à peine organisée. La plupart des sociétés de construction étaient trop petites pour exécuter des projets de grande envergure. En outre, les entrepreneurs travaillaient d'habitude indépendamment les uns des autres, chacun développant son propre système de construction. De ce fait, le marché était inondé de systèmes de construction alternatifs, les uns plus pratiques que les autres, mais il n'y avait pas de base commune permettant de les comparer. Le gouvernement dut mettre au point une méthode d'évaluation, une tâche qui fut confiée au « Comptoir National des Matériaux » (CNM, 1920), une sous-section de la SNHBM qui se concentrait sur les (nouveaux) matériaux et techniques de construction. Pour cela, en 1920-1922, le CNM organisa un site de construction expérimental à « La Roue » à Anderlecht, où les entrepreneurs et les constructeurs de systèmes purent faire la démonstration de leur système de construction. Finalement, dix-huit systèmes de construction différents furent testés, la plupart en béton maigre : celui-ci était relativement bon marché, grâce à la petite quantité de ciment et à l'utilisation de déchets industriels tels que des cendres. Ainsi, la construction en béton maigre devint rapidement presque un synonyme pour les méthodes de construction alternatives en général. À ce stade expérimental, différentes options furent explorées : treize systèmes utilisaient des blocs préfabriqués, trois systèmes étaient basés sur un squelette préfabriqué (Fig. 2)[2] et deux systèmes recouraient au béton monolithe coulé sur place (Fig. 3)[3].

La majorité des systèmes utilisés à Anderlecht étaient donc basés sur des techniques semi-traditionnelles faisant usage de blocs préfabriqués. Ce fut également le cas pour d'autres projets contemporains : une étude de brevets et de revues techniques a donné une liste comportant plus de 100 méthodes de construction alternatives, quasi toutes basées sur des blocs préfabriqués. Cependant, l'expérience à Anderlecht tourna en faveur des systèmes de construction monolithes.

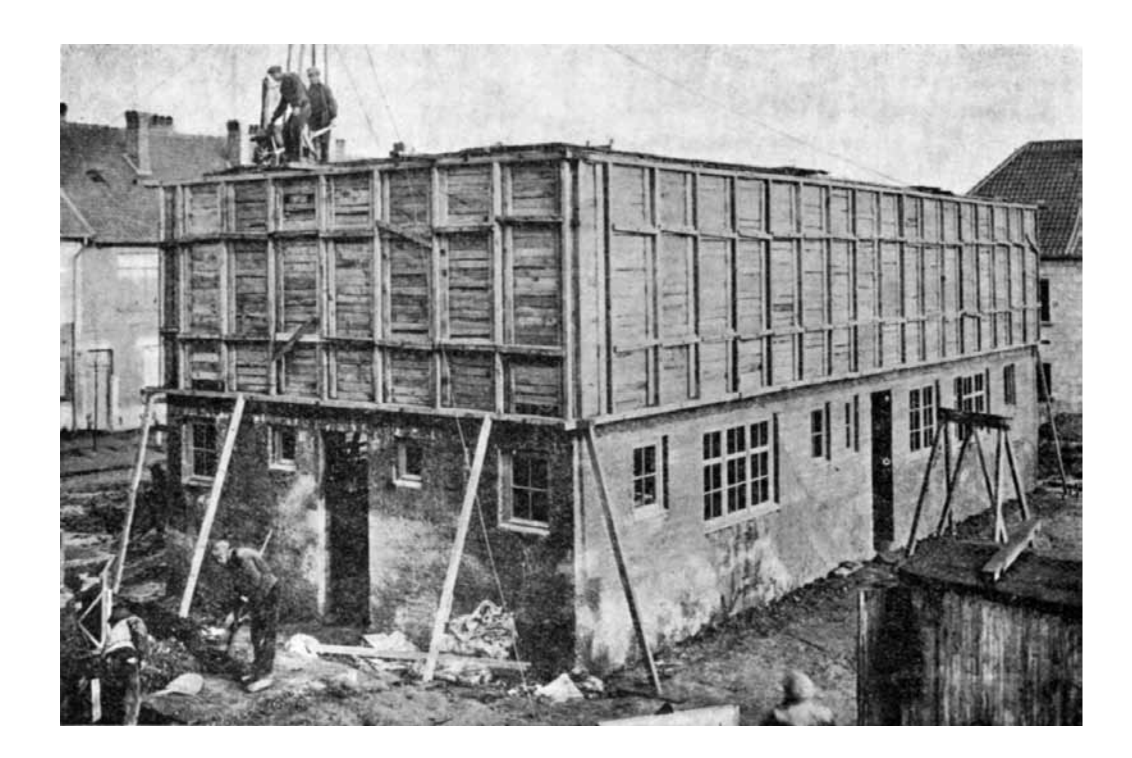


Figure 3 : Le système « Non Plus » à La Roue[3]

En 1922, le CNM lança une grande campagne pour promouvoir les systèmes de construction monolithes avec de larges coffrages en bois. Le système allemand « Non Plus » en particulier devint très populaire, grâce à des visites sur le terrain, des articles dans des revues, l'assistance technique et l'exonération de droits de brevet. Malgré l'absence de résultats objectifs de test, la campagne de promotion ne rata pas son effet : il fut généralement admis que les méthodes de construction monolithes offraient une solution quantitative convaincante, tant sur le plan esthétique, qu'économique et technique. Les années suivantes, le système « Non Plus » fut utilisé dans *Klein Rusland* et à La Cité Moderne tandis que le système belge « Celtic », développé d'après l'exemple de « Non Plus », fut appliqué au Kapelleveld. Ces trois cités-jardins sont largement reprises dans l'historiographie architecturale, mais l'histoire est souvent incomplète. Par exemple, au sujet de *Klein Rusland*, on sait que Hoste avait initialement conçu le projet en maçonnerie traditionnelle, mais qu'il l'a modifié en béton en raison du manque de briques. Mais avant de se tourner vers le système « Non Plus », il utilisait des blocs préfabriqués en béton au moyen du système « Winget ». L'extérieur de ces maisons étant cimenté, la différence entre les deux est invisible. De même, Hoste n'a pas proposé le « Non Plus » de lui-même ; ce système lui fut suggéré par Peniakoff, un des fondateurs de la société locale de logement.

Les grands absents dans cette histoire, ce sont les ingénieurs. Leur absence s'explique en partie par les défis structuraux limités dans le logement, mais le béton maigre exigeait tout de même des connaissances scientifiques spécifiques, par exemple concernant les caractéristiques thermiques et hygroscopiques. En 1924, le Ministre de l'Industrie et du Travail mit en place une commission afin de conduire des expériences scientifiques dans le laboratoire de l'École Militaire à Bruxelles. Les résultats de ces recherches, publiés en 1925-26, furent en général en faveur du béton monolithe. Malgré l'avis positif, le rapport fut rattrapé par la réalité : des changements dans la politique de la SNHBM conduisirent à l'échec des projets de logement collectif et, presque par définition, à l'échec des méthodes de construction alternatives, car les maîtres d'ouvrage privés n'étaient pas capables de mettre sur pied les grands projets nécessaires à l'application de ces méthodes. Ce n'est qu'après la Seconde Guerre mondiale que les méthodes de construction alternatives furent reprises pour des applications à grande échelle dans les logements publics.

# LE BÉTON PRÉFABRIQUÉ DANS LE BÂTIMENT DE LA FIN DE LA SECONDE GUERRE MONDIALE À NOS JOURS. DE LA PRÉFABRICATION FERMÉE À LA PRÉFABRICATION OUVERTE

**Jacques I. Schiffmann**

## INTRODUCTION

Quiconque se promène en spectateur attentif des nombreux chantiers de construction dans nos villes, constate que quasi tous les chantiers font appel aujourd'hui, en tout ou partiellement, à des éléments structuraux préfabriqués en béton, et à une industrialisation de plus en plus poussée des procédés de construction.

Ce phénomène a débuté au sortir de la Seconde Guerre mondiale, période où les besoins étaient énormes dans tous les secteurs : celui du logement, des bâtiments scolaires, des bâtiments administratifs, des bâtiments industriels, des ponts, ouvrages d'art, etc.

Pour répondre à tous ces besoins, en améliorant aussi la productivité du secteur, en construisant plus rapidement avec des éléments structuraux de grande qualité produits en usine, et en réduisant les coûts et les délais, « l'Industrie de la Construction » a su évoluer rapidement grâce à la préfabrication et à l'industrialisation du secteur. Elle est passée d'un mode quasi artisanal à l' « Industrie de la Construction » dynamique d'aujourd'hui. Passons en revue les grandes étapes de cette évolution.

**Les différents types de systèmes constructifs**

A. Bâtiments en panneaux de grandes dimensions en béton
B. Bâtiments à ossature, avec éléments linéaires ou portiques
C. Bâtiments à structure mixte, panneaux et ossature linéaire
D. Bâtiments avec cellules tridimensionnelles

**Les différents types d'éléments structuraux préfabriqués en usine**

1. Planchers préfabriqués en béton armé ou précontraint
2. Panneaux porteurs en béton armé
3. Façades porteuses en béton armé ou en béton architectonique
4. Façades porteuses ou non en béton architectonique
5. Éléments linéaires en béton armé ou précontraint
6. Éléments portiques en béton armé ou précontraint
7. Éléments spéciaux, escaliers, etc.
8. Cellules tridimensionnelles en béton
9. Façades légères non portantes (verre, bois, aluminium...)
10. Façades en béton léger autoclavé
11. Allèges de façade en béton armé

Figure 1 : Tableau de synthèse des systèmes constructifs et éléments structuraux préfabriqués en usine[1].

**Systèmes constructifs et éléments structuraux préfabriqués en usine**

| Types de bâtiment | Systèmes constructifs (voir ci-dessus) | Éléments utilisés (voir ci-dessus) | Façades | Avantages |
|---|---|---|---|---|
| Hôtels | A, système transversal<br>ou B, ossature<br>ou D, tridimensionnel | 1, 2, 7<br>2, 5, 7<br>8, 7 | 3 ou 9<br>idem<br>idem | Rapidité, économie et haut degré de finition en usine pour D |
| Logements | A, système transversal<br>ou A, système longitudinal<br>ou A, système croisé | 1, 2, 7 | 3 ou 9<br>3<br>3 | Rapidité de construction, économie |
| Bâtiments utilitaires : bureaux, écoles, hôpitaux, bâtiments administratifs | A, système longitudinal<br>ou B, ossature<br>ou C, structure mixte | 1, 2, 5, 6, 7 | 3 ou 4 ou 9 | Rapidité d'exécution, flexibilité d'occupation, libre choix des façades |
| Halls industriels, à grandes portées libres | B, ossature | 1, 5, 6, 7 | 4, 10 | Rapidité d'exécution, grands espaces libres, flexibilité d'occupation |
| Bâtiments spéciaux, parkings, stades sportifs, halls de sports | B, ossature | 1, 5, 6, 7 | 3, 9, 10, 11 | Rapidité d'exécution, flexibilité d'occupation, quasi pas de finitions |

## DU DÉBUT DES ANNÉES 50 JUSQUE VERS 1970

**Le domaine du logement, construction en panneaux de béton**

L'industrialisation s'amorce et les formes prises par ce développement dans les différents pays industrialisés sont assez voisines pour qu'on puisse parler d'une première génération de l'industrialisation du bâtiment, caractérisée par le développement spectaculaire des procédés à base de grands panneaux en béton dans le secteur du logement, et des constructions à ossature en béton armé et précontraint, pour les constructions industrielles.

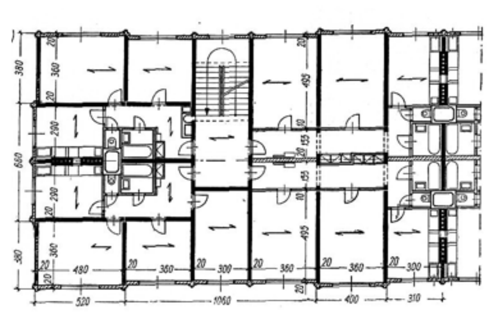
C'est un système de préfabrication fermé, c'est-à-dire qu'on standardise le produit final, le bâtiment qui est pensé, étudié et exécuté comme un tout, par un fabricant donné, qui a son système bien déterminé, et qui produit en grande série des constructions répétitives. Pour le logement, citons, en France, les procédés brevetés Camus, Coignet, Barets, au Danemark, le système Larsen. Il en est de même aux États-Unis, en URSS et dans les autres pays industrialisés.
Le pourcentage de constructions de logements industrialisés était en 1969, de 30 % en URSS, 25 % aux États-Unis, 19 % aux Pays-Bas, 12 % au Royaume-Uni, 10 % en France et 2 % en Belgique.

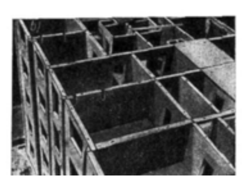
Suivant l'orientation des panneaux verticaux porteurs, on parle de système transversal quand les murs porteurs sont perpendiculaires aux façades, ce qui convient aux bâtiments élevés de dix à douze étages, de système longitudinal quand ils sont parallèles aux façades, ce qui donne des bâtiments structuralement moins rigides mais plus flexibles à l'usage, limités en général à six étages, et de système croisé quand les murs porteurs sont situés dans les deux directions (Fig. 2)[2].
Cette préfabrication lourde correspondait aux grandes opérations groupées de bâtiments globaux répétitifs construits sur un même site, ce qui a conduit aux grands ensembles présents dans les périphéries de la plupart des grandes villes européennes.

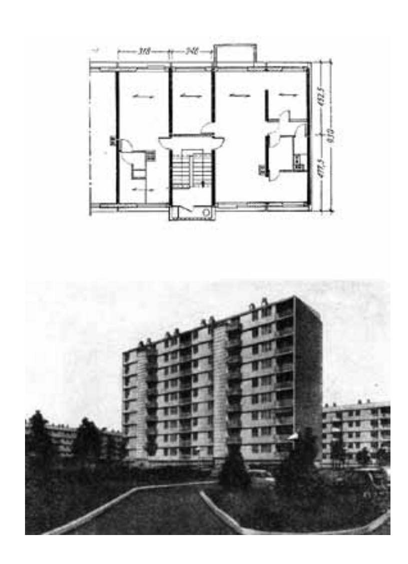
**Le domaine des constructions industrielles préfabriquées à ossatures en béton**

Des usines de préfabrication se créent dans tous les pays, et à partir d'un nombre limité d'éléments standards, élaborent des bâtiments industriels types qu'ils proposent souvent directement aux clients utilisateurs, comme produits finis quant au gros œuvre. Ces bâtiments sont conçus pour utiliser de manière répétitive des grandes séries d'éléments identiques, en béton armé pour les colonnes ou les portiques et en béton précontraint pour les planchers et les poutres (Fig. 3)[3].
Plus tard, ces usines élargiront la gamme de leurs produits aux panneaux en béton armé et aux éléments de façade en béton architectonique, et viseront ainsi également le secteur des bâtiments utilitaires et des logements.

Ce processus se fera sur une certaine durée. Au début, les délégués techniques des usines de préfabrication documentent les architectes, ingénieurs-conseils et entrepreneurs sur leurs produits et leurs modes d'assemblage, par des brochures techniques. Les délégués inter-







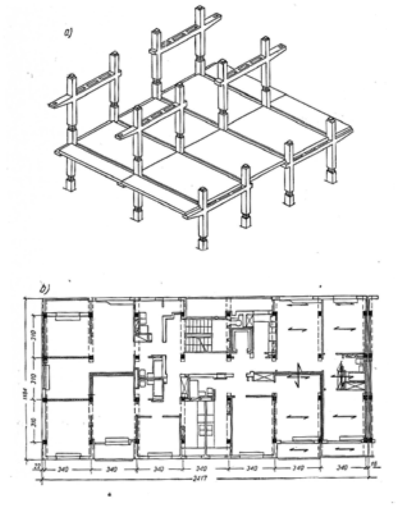


Figure 2 : Systèmes à panneaux croisés et transversaux, système à portiques longitudinaux[2]

viennent souvent auprès d'eux dès le début des études pour essayer d'orienter celles-ci vers la préfabrication, car les projets se concevaient le plus souvent à cette époque de manière traditionnelle. Ils démarchent aussi les maîtres d'ouvrage, pour les persuader des avantages en matière de coût et de délais, et tenter de les convaincre de faire appel à leurs produits et systèmes dès la conception du bâtiment.

La seconde méthode utilisée par les usines de préfabrication pour faire progresser leur secteur a consisté à proposer systématiquement des variantes en béton préfabriqué, lors des soumissions publiques et privées. Lorsqu'ils emportaient le marché grâce à un prix compétitif et à une réduction des délais par rapport à la solution traditionnelle, cela impliquait de devoir modifier les plans et pouvait entraîner des aléas imprévus lors de la remise de prix.

Mais ce processus était difficilement admissible alors pour les soumissions du secteur public, où les règles d'attribution des marchés étaient peu compatibles avec ces variantes libres.

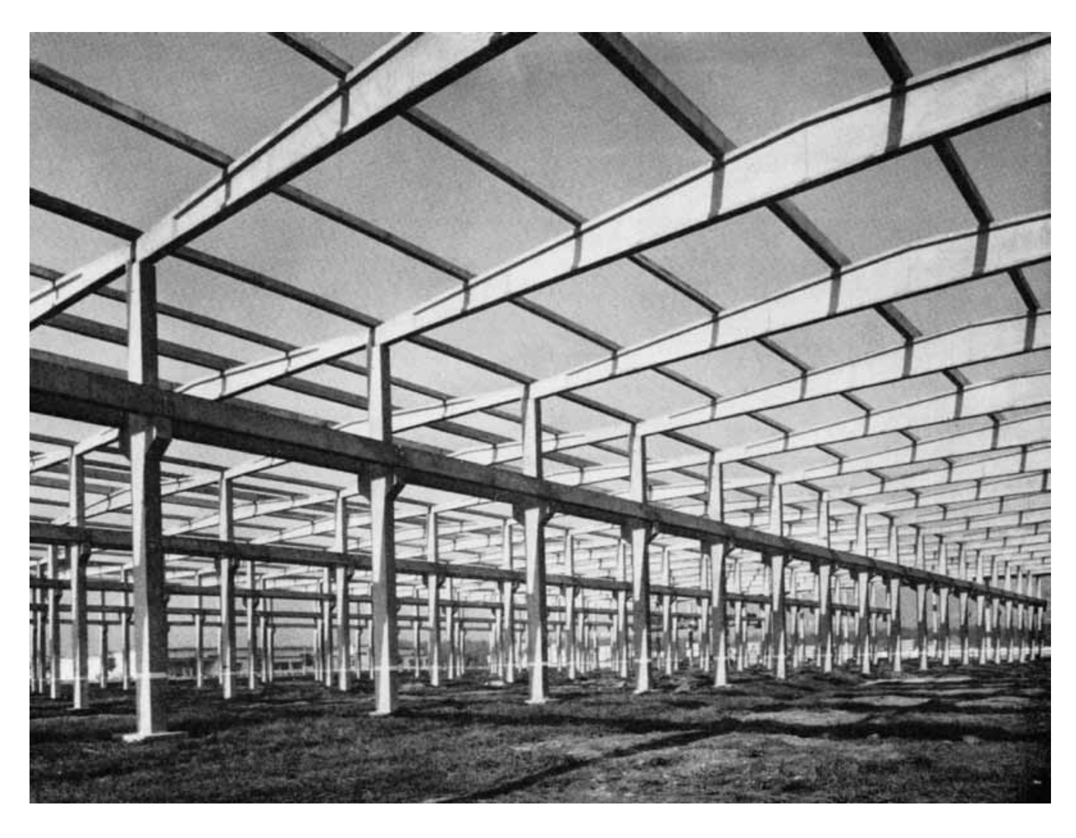
Le système évoluera dans les années 70 et 80, car les avantages de la préfabrication s'étant imposés, les auteurs de projet concevront et spécifieront directement leurs projets en béton préfabriqué, à partir d'éléments standards produits dans la plupart des usines, ce qui garantira la libre concurrence entre les soumissionnaires. Nous y reviendrons plus loin.

**Mai 1968 : l'accident de l'immeuble de Ronan Point à Londres**

Le 16 mai 1968, une explosion de gaz dans une pièce d'angle au 18ème étage propulsa le mur de façade vers l'extérieur. Les murs et planchers supérieurs s'effondrèrent et créèrent par leur impact une réaction en chaîne qui entraîna l'effondrement de tout l'angle de l'immeuble à appartements (Fig. 4)[4]. Le phénomène, baptisé « progressive collapse » ou destruction en chaîne, déclencha dans tous les pays une vague d'inquiétude vis-à-vis de ce type de constructions préfabriquées. On réalisa que les concepts structuraux de l'époque manquaient de robustesse pour résister à de telles actions accidentelles, le point faible se situant au niveau des assemblages entre éléments préfabriqués. Des commissions techniques furent crées dans beaucoup de pays pour analyser le phénomène, déterminer les causes et établir des normes et recommandations pour empêcher à l'avenir la survenance de « progressive collapses », ou tout au moins à limiter l'extension du dommage, dans le cas où survient une sollicitation exceptionnelle.

En Belgique, la Commission Industrialisation du Centre Scientifique et Technique de la Construction (CSTC) élabora et publia en 1970 les

Figure 3 : Hall industriel type préfabriqué en béton armé et précontraint[3]



« Recommandations pour le calcul et l'exécution des constructions industrialisées en béton »[6] et en 1972 « Exemples d'application des Recommandations CSTC 1970 »[7]. Ces recommandations donnent les principes généraux de conception pour les constructions par grands panneaux, mais également pour les constructions à ossature linéaire et pour tous autres systèmes industrialisés en béton. Deux impératifs majeurs se dégagent de ces recommandations :

- prévoir une bonne conception des joints entre éléments préfabriqués, en y plaçant des armatures de chaînage, en les profilant avec des crantages de manière à conférer à la jonction une bonne résistance au cisaillement après son bétonnage, créant ainsi un squelette d'armatures ductiles liant mécaniquement le bâtiment dans les trois directions.

- concevoir et dimensionner la construction de façon à veiller à ce qu'aucune destruction en chaîne ne se produise après un dégât accidentel initial important. La construction doit avoir assez de robustesse et de ductilité pour qu'un schéma alternatif de transfert des charges puisse se créer après le dommage primaire inévitable mais limité.

Le lecteur trouvera une actualisation exhaustive de cette problématique dans l'article de l'ingénieur Arnold Van Acker dans la revue « Béton »[8]

La problématique est de plus en plus à l'ordre du jour, en raison d'une part, de l'utilisation accrue de la préfabrication en béton pour des bâtiments de plus en plus élevés et d'autre part des risques accidentels accrus liés au terrorisme.

## DE 1970 JUSQU'À LA FIN DES ANNÉES 90

Le mythe de la grande série a beaucoup perdu de sa force, et l'aspiration à la qualité s'est renforcée.

- Qualité de l'urbanisme, en réaction à l'uniformité de l'architecture et aux ségrégations démographiques et sociales de plus en plus problématiques.

- Qualités techniques des bâtiments, en réaction à toutes sortes d'insuffisances qui ont caractérisé les bâtiments de la première génération : surfaces insuffisantes, mauvaise isolation thermique et acoustique, etc.





Figure 4 : L'accident de Ronan Point[4]

Ces aspirations se sont traduites par la percée de la seconde génération de l'industrialisation du bâtiment, basée sur une préfabrication ouverte, ou la construction à partir de composants industriels compatibles.

Cela a conduit à une meilleure qualité fonctionnelle et à une plus grande diversité architecturale, sans nécessiter la construction de grandes séries de bâtiments identiques.

Ce processus a été rendu possible grâce à la définition et au respect de différents critères :

- en construisant à partir de composants interchangeables disponibles dans les différentes usines de préfabrication, et assemblés sur chantier sans difficulté ni retouche, grâce au respect de tolérances dimensionnelles normalisées imposées.

- en respectant des règles normalisées de coordination dimensionnelle lors de la conception du projet.

- en choisissant les composants qui satisfont à des performances techniques imposées, chaque composant ayant sa fiche technique garantissant ses différentes performances, certifiées par des organismes techniques indépendants.

- en respectant les normes, recommandations et assemblages standardisés, pour assembler sans difficultés sur chantier les différents éléments préfabriqués.

Dans le système traditionnel antérieur, on décrivait comment le bâtiment devait être construit, et donc tous les éléments et matériaux intervenant dans la construction étaient entièrement définis par les plans et les clauses techniques.

Dans le système de préfabrication ouverte, l'introduction du concept de performance vise à

spécifier comment le bâtiment doit fonctionner, en globalité ainsi que pour tous ses composants, sur base de critères définis par les utilisateurs, traduits de manière scientifique par des critères objectifs. Les moyens à mettre en œuvre pour réaliser les performances imposées sont laissés au choix des producteurs et entrepreneurs.

En Belgique, un intense travail de recherche et d'étude du secteur de la construction a conduit à la publication en 1975, par le Syndicat d'Études IC-IB, d'un Guide des performances du bâtiment[9].

À partir de ce moment, les pouvoirs publics ont lancé des soumissions sous forme d'appel d'offres concours, pour leurs bâtiments scolaires, administratifs et autres, pour encourager le processus d'industrialisation. Pour illustrer ce processus, voici un exemple vécu par l'auteur, dans les années 80.

Le Ministère de la Défense avait lancé un appel d'offre concours pour la réalisation d'un important complexe administratif à Evere. Le projet était défini par des plans schématiques traduisant pour chaque niveau la programmation détaillée d'occupation, et un cahier de charges très détaillé définissant de manière globale pour chaque technique, et pour chaque composant, les performances exigées. Les « règles du jeu » étaient annoncées :

- chaque soumissionnaire devait remettre prix sur base d'études réalisées par le bureau d'architecture et les ingénieurs-conseils de l'équipe qu'il avait constituée pour cet appel d'offre concours ;
- chaque rubrique faisait l'objet d'une cotation par le maître de l'ouvrage et ses conseils, en fonction de la qualité des propositions et du respect des performances imposées, la répartition des points étant connue d'avance, pour la qualité architecturale, pour la conception structurale, pour chaque technique spéciale, et ainsi de suite ;
- les prix globaux remis par les différents soumissionnaires étaient divisés par le nombre de points obtenus, et le marché était attribué à celui qui obtenait le rapport le plus bas.

Lors de la réalisation du projet, une importante préfabrication de la structure a été mise en œuvre, tant en système à panneaux qu'en ossature linéaire.

## À PARTIR DES ANNÉES 2000

L'usage de la préfabrication est complètement intégré aujourd'hui par les différents acteurs de la construction. Le développement de bétons à haute résistance, les progrès qualitatifs des éléments produits, notamment en béton architectonique, les gains en délais et les gains financiers induits par la réduction des délais, tout milite en faveur de la conception en béton préfabriqué, dès le début des études, chaque fois que le projet s'y prête.

Ne pas le faire, c'est se condamner à de multiples ré-études suite aux inévitables propositions de variantes des entreprises adjudicataires. Autres avantages appréciés, le caractère quasi fini des bétons préfabriqués, et la résistance au feu obtenue par les structures elles-mêmes.

Les usines de préfabrication, apprécient toujours autant les projets utilisant des grandes séries d'éléments identiques, mais ont su évoluer aussi vers plus de flexibilité en coopérant de manière interactive avec les auteurs de projet, pour faire de la préfabrication sur mesure, au cas par cas, bâtiment par bâtiment, quelles que soient ses particularités ou sa complexité.

On a aussi pu constater, au courant de la dernière décennie, une évolution significative dans la construction des immeubles-tours, qui dans le passé étaient réalisés majoritairement en ossature métallique. Cette tendance s'est réellement inversée, comme le montrent des projets de bâtiments-tours récents à Bruxelles, construits en béton préfabriqué armé et précontraint.

## LA *DEXIA TOWER*, PLACE ROGIER À BRUXELLES - 2006

Pour illustrer ce propos et en guise de conclusion, voici une brève description de la *Dexia Tower* (Architectes : Philippe Samyn and Partners architects & engineers, M. & J.M. Jaspers - J. Eyers & Partners - Ingénieurs « Structure » : Bureau d'études Setesco - Responsable des études : Jacques I. Schiffmann).
Il s'agit d'un bâtiment de bureaux de 137 m hors sol composé de 37 étages (hauteur d'étage de 3,60 m et hauteur utile de 2,70 m) et cinq niveaux en sous-sol. Ce bâtiment fondé sur barrettes préfabriquées en béton mise en place dans des tranchées embouées a été construit par la méthode « up and down » (simultané-



Figure 5 : Noyau central exécuté en coffrage grimpant[10]

ment vers le haut et le bas). Le noyau central a été réalisé en coffrage grimpant (Fig. 5)[10]. Les 90 cm d'espace technique entre sol fini et plafond des étages sont constitués de 12 cm pour le faux plancher, 38 cm pour la structure, 30 cm pour les équipements techniques et 10 cm pour les plafonds froids.

La superstructure a été totalement préfabriquée (Fig. 6)[11] : colonnes, poutres, planchers, escaliers. En voici quelques détails :

- colonnes de 60 cm de diamètre, du 3ème au dernier étage, préfabriquées par deux niveaux. De haut en bas, la résistance à la compression du béton augmente de 30 à 80 N/mm², avec des pourcentages maximum d'armatures de 4 %. Lorsque le béton armé seul ne suffit plus à reprendre les charges, les colonnes sont renforcées par des profilés métalliques de section et de qualité croissante, incorporés au béton en usine ;

- planchers préfabriqués alvéolés précontraints de 32 cm d'épaisseur et de 13,50 m de portée, avec couche de solidarisation en béton armé de 6 cm ;

- poutres en béton précontraint dont quelques-unes, en partie centrale, sont renforcées par des profilés métalliques, afin d'en limiter la hauteur et de permettre le passage de gaines techniques ;

- dispositifs et chaînages prenant en compte la problématique du progressive collapse.



Figure 6 : Ossature préfabriquée en béton armé et précontraint[10]

## *IEDER ZIJN HUIS* : LA PRÉFABRICATION APPLIQUÉE À UN IMMEUBLE DE LOGEMENTS SOCIAUX. 1960-2014

**Charlotte Nys et Jan de Moffarts**

### BREF HISTORIQUE

L'architecte Willy Van Der Meeren fut chargé en 1952 de la conception d'une tour de logements sociaux (Fig. 1)[1] sur le site de la société de logements sociaux *Ieder Zijn Huis* à Evere.
Le concepteur Willy Van Der Meeren (1923-2002) a achevé ses études d'architecte à La Cambre juste après la Seconde Guerre mondiale. En cette période, ses premiers projets consistaient généralement à reconstruire l'habitat collectif (social). Dans la commune bruxelloise d'Evere, le court mayorat du socialiste Franz Guillaume aboutira vers 1950 à une collaboration fructueuse avec Willy Van Der Meeren en vue de bâtir dans cette ancienne commune catholique dite du chicon. Les deux hommes étaient non-conformistes, modernes, inspirés et inspirants, et ils partageaient un même objectif hautement social. Ils étaient des orateurs qui utilisaient le langage (l'un en politique et en poésie, l'autre en rhétorique et en architecture) pour essayer de réaliser un objectif social et sociétal supérieur en dépit de la rigueur de la réglementation urbanistique et des valeurs catholiques de l'époque.
La tour pour *Ieder Zijn Huis*, que Willy Van Der Meeren commença au début des années 1950 mais qui en raison de l'essor du secteur de la construction ne put être réalisée qu'après l'Expo 58, est une lecture sophistiquée des idées modernistes et corbuséennes par un constructeur à l'esprit rationnel, ce qu'est véritablement Willy Van Der Meeren. Il va à l'essentiel, sans s'encombrer des artifices et il « pimente le tout » - dixit Willy Van Der Meeren - « de l'envie de faire boum ».
Formes intuitives des recherches constructives et innovantes occupent une place privilégiée dans la conception de la tour *Ieder Zijn Huis*. Willy Van Der Meeren y a intégré ses propres principes de vie en société, ses idées sur l'habitat moderne, un mode de construction clair et bon marché, une hiérarchie de plans et de façades, la couleur, l'industrialisation, la modulation et la standardisation. Ce sont ces trois dernières propriétés qui distinguent



Figure 1 : Tour *Ieder Zijn Huis* : façade est[1]






Figure 2 : La logique de la construction[2]

Willy Van Der Meeren des autres architectes modernistes de cette période.

## LA CONSTRUCTION EN 1960

Le contexte économique de l'époque obligeait Willy Van Der Meeren à chercher des systèmes innovants de production architecturale dans un projet très étroitement modulé et économique. Seuls les portiques et les poutres de façades sont coulés sur place dans un coffrage lisse. Les portiques deviennent plus petits à mesure que l'on gravit les étages. Le reste de la structure n'est complété que par des éléments préfabriqués (Fig. 2)[2], les hourdis, les cinq éléments de façades et les escaliers, dont les dimensions reposent totalement sur le Modulor de Le Corbusier à savoir 113 cm ou la distance entre le sol et le nombril.

**Les éléments préfabriqués**

Les hourdis creux préfabriqués en béton sont jumelés avec les portiques. Les hourdis sont liés à l'armature supérieure de la poutre des portiques par le biais d'un ferraillage intégré dans les alvéoles des hourdis assurant ainsi le contreventement longitudinal. Les hourdis ont tous une épaisseur de 15,5 cm et une largeur de 56,5 cm soit un demi-module. Les hourdis sont réalisés dans un coffrage métallique afin d'obtenir du côté inférieur une surface lisse pouvant rester apparente. Le joint entre les hourdis est accentué par un profil spécifique afin de diriger et marquer la fissuration éventuelle entre deux hourdis.

Ce système de hourdis a été mis au point en 1953-1954 par les architectes Palm et Willy Van Der Meeren en collaboration avec l'ingénieur Smets, responsable d'une société spécialisée en éléments préfabriqués en béton armé.

Les éléments de façades sont autoportants, en béton armé, et doivent également permettre l'isolation. D'où leur composition logique de 5 cm de béton à l'intérieur et à l'extérieur entourant une âme d'isolant de 2 cm en polystyrène expansé dans les parties pleines des panneaux. Côté extérieur, le béton riche résiste à la pluie et au gel tandis qu'à l'intérieur du béton maigre est utilisé (Fig. 6)[2].

Les panneaux ont une largeur totale de 4 m 52 et une hauteur de 2 m 36. Ils sont de cinq types en fonction du nombre et de l'emplacement des ouvertures ; malgré cela, un seul moule a suffi pour réaliser tous les panneaux.

Les archives ne permettent pas de savoir comment les panneaux de façades ont été

Figure 3 : Sondage ; démontage d'un panneau de façade[3]




placés. Comme les poutres inférieures et supérieures étaient déjà coulées (visible sur les photos d'archives du chantier), ils ont uniquement pu être glissés de bas en haut dans la façade. Un panneau de façade en béton a été démonté (Fig. 3) [3] pour déterminer l'ancrage à la structure. Ce sondage a été effectué pour comprendre comment les panneaux ont été initialement mis en place et déterminer comment l'entrepreneur chargé de la rénovation pourra démonter la façade. Il ressort de ce sondage que les panneaux ont été glissés par le bas et ne tiennent en place que grâce au mortier de jointoiement.
Les escaliers des deux cages de circulation et la moitié des escaliers menant aux appartements en duplex sont en béton armé. Les volées de tous ces escaliers sont réalisées par deux types d'éléments préfabriqués. La surface inférieure des escaliers est en béton lavé afin de pouvoir rester apparente (Fig. 4) [2].

L'ensemble se traduit par un bâtiment à l'échelle humaine, dont la structure et l'aménagement s'harmonisent en toute simplicité. Tous ces éléments préfabriqués ont été conçus de manière à ne plus nécessiter de finition, à part « un petit coup de pinceau ». Le matériau lui-même constitue la finition : on découvre ici l'expression par excellence du rationalisme constructif de Willy Van Der Meeren.

## LA RÉNOVATION EN 2012

Plus de 50 ans après sa construction, le manque d'isolation thermique de la façade, l'insuffisance de l'isolation acoustique entre les appartements, l'obsolescence des installations techniques, etc. imposent la rénovation lourde de ce bâtiment (Fig. 5)[1].

Le maître d'ouvrage de cette restauration est Beliris, le maître d'œuvre Origin Architecture & Engineering et l'entreprise générale chargée des travaux CEI - De Meyer. Les réflexions pour cette rénovation se font en concertation avec la Direction Monuments et Sites de la Région de Bruxelles-Capitale.
La philosophie architecturale holistique de Willy Van Der Meeren donne au bâtiment une âme, tout en imposant des conditions marginales très strictes pour la rénovation. L'intégration de tous ses principes dénote un subtil équilibre, fragile cependant comme un château de cartes où chaque élément est relié aux autres. L'adaptation pérenne du bâtiment aux exigences architecturales et au confort actuels doit s'effectuer à l'intérieur d'une étroite grille où les deux mètres de hauteur libre entre le sol et le portique sont déterminants.
Une rénovation s'impose pour des raisons de sécurité et de confort et la valeur patrimoniale du bâtiment est ici un paramètre important.

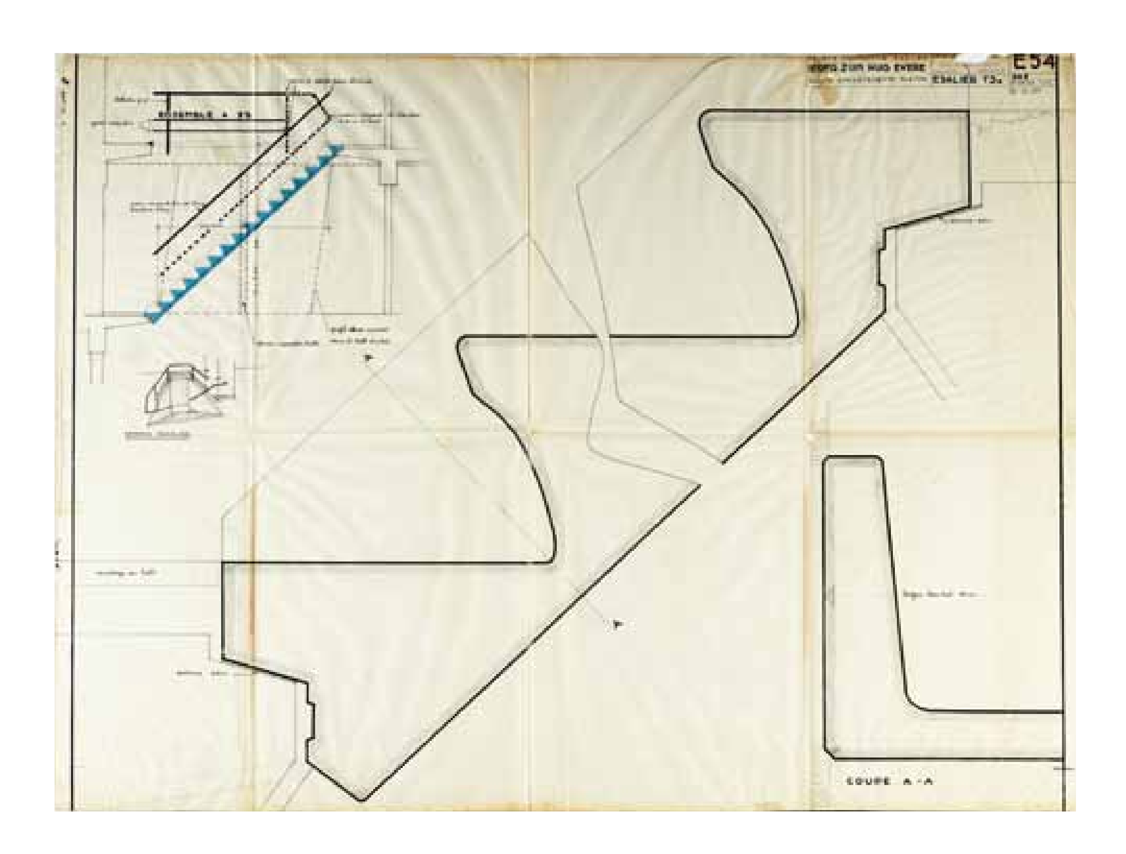



Figure 4 : Plan original de détail de l'escalier dans les appartements duplex[2]

Dans ce contexte, il convient de s'interroger sur la place de l'homme entre les extrêmes suivants : faut-il adapter le bâtiment aux normes actuelles ou l'usage doit-il s'adapter aux qualités du bâtiment ? Cette question peut également se poser comme suit : l'idée de progrès, de modernité et l'approche fonctionnelle et rationnelle du créateur du projet sont-elles plus importantes que la conservation du matériau d'origine ? Lors de la réception de ce bâtiment, l'ensemble était très innovant sur le plan de la technique. L'architecte et le maître d'ouvrage ont réellement eu l'intention de créer des opportunités de progrès social, afin d'élever l'homme par la qualité de son environnement. Aujourd'hui le bâtiment est devenu « antisocial », parce que les frais énergétiques sont particulièrement élevés et que le niveau de confort y est médiocre. La recherche de progrès social par le biais d'un logement qualitatif et progressiste est toujours à l'ordre de jour. Il a donc été décidé que l'idée de progrès et de modernité développée par Willy Van Der Meeren était au moins aussi importante que la décision d'adapter le bâtiment aux exigences actuelles de confort, de résistance au feu et d'isolation. Dans la réflexion pour la rénovation du bâtiment, la principale décision a été de conserver le béton et la préfabrication qui caractérisent le bâtiment. Les hourdis et les escaliers préfabriqués seront conservés, seuls les panneaux de façades seront renouvelés
La décision capitale de remplacer les actuels panneaux de façade en béton par de nouveaux panneaux sandwichs en béton résistant au feu et thermiquement performant répondra à l'ambition de garder l'identité et la matérialité du bâtiment entièrement conçu en béton mais d'isoler sa nouvelle peau (Fig. 6-7)[2,3].

C'est la façade en béton qui confère au bâtiment son identité spécifique. Les panneaux sandwichs avec leur superposition de fenêtres carrées sont la signature qui rend compte de l'esprit et de la méthode de Willy Van Der Meeren. Ils ont été conçus comme un produit industriel et ont été insérés dans la façade en tant qu'éléments finis, et seront remplacés par d'autres, répondant aux normes actuelles de sécurité incendie, d'étanchéité à l'air, d'isolation et de protection antichute, et pouvant être mis en œuvre selon les principes et les méthodes d'origine. Les premiers panneaux de façades étaient très minces. La technologie du béton, qui offre actuellement de nombreuses possibilités, a permis d'obtenir une section verticale et horizontale minimale qui permet de limiter le poids tout en conservant une ouverture maximale au niveau des fenêtres. Les nouveaux panneaux sandwichs sont composés d'un voile portant en béton armé de 12 cm côté intérieur, de 7 cm de béton à l'extérieur et d'une isolation de 15 cm de type polyuréthane entre les deux. Les poutres et colonnes initialement apparentes de la façade sont reprises dans la géométrie du nouveau panneau par un jeu de reliefs et de textures. La reconstruction des corniches (dépassement horizontal) permet de satisfaire aux normes de prévention incendie : longueur développée d'un mètre entre les étages pour éviter la propagation du feu. Ce « nez » sous les panneaux forme à nouveau une continuité sur la largeur du bâtiment, qui donne à la façade son caractère horizontal. La finition des panneaux d'origine a été reprise : du béton lavé pour les zones entre les structures et du béton lissé pour celles devant les structures.



Figure 5 : Panneau de façade vu de l'intérieur - état actuel du bâtiment [1]

La poutre de ceinture existante en béton ainsi que le premier hourdis adjacent seront démolis et remplacés par une nouvelle poutre dans le prolongement des hourdis existants. Autour des colonnes, cette poutre s'élargit pour servir d'appui aux panneaux. Les panneaux en béton deviennent ainsi porteurs d'une colonne à l'autre. Dans la partie en décrochement, des rails viennent assurer la fixation mécanique du dessus des panneaux. Des solins en EPDM (éthylène-propylène-diène monomère) joignent ceux-ci à la structure en assurant l'étanchéité à l'air. Chaque panneau est recouvert par le panneau suivant. Les avantages initiaux de ce système restent valables : assemblage des panneaux à la manière d'un « mécano », abaissement du coût des travaux et facilité d'exécution grâce à la préfabrication, durabilité des éléments

préfabriqués en béton, intégration des fenêtres en atelier, inertie et isolation de qualité.

Pour les ouvertures ou les fenêtres dans les panneaux, Willy Van Der Meeren voulait un maximum de fenêtres dans un cadre simple et strictement modulé : un seul moule pour fabriquer les panneaux de façade. Il y a intégré 8 fenêtres carrées, dont une seule est ouvrante, ordonnancées selon le Modulor de Le Corbusier. Deux fenêtres ont été supprimées aux endroits correspondants aux placards ou aux bureaux. Dans les chambres, toutes les fenêtres ont été supprimées dans le bas des panneaux. Pour les nouveaux panneaux, les mêmes principes ont été retenus, mais deux ajouts ont été nécessaires pour répondre à la législation actuelle :

- La protection au feu. Une distance minimale d'un mètre entre deux compartiments adjacents doit être réalisée en matériau ayant une résistance au feu d'une heure. Dans le sens vertical, le « nez » sous les panneaux assure la distance nécessaire entre les fenêtres. Horizontalement, des fenêtres ont été supprimées ;
- Le confort thermique. Certaines fenêtres ont été supprimées pour limiter l'apport solaire et le risque de surchauffe.

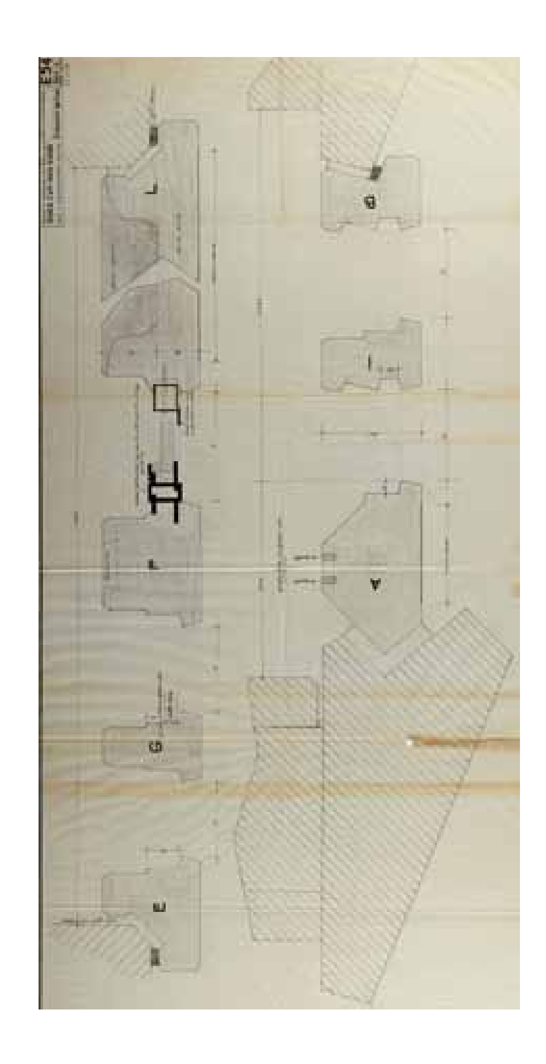


Figure 6 : Plan de détails des panneaux originaux[2]

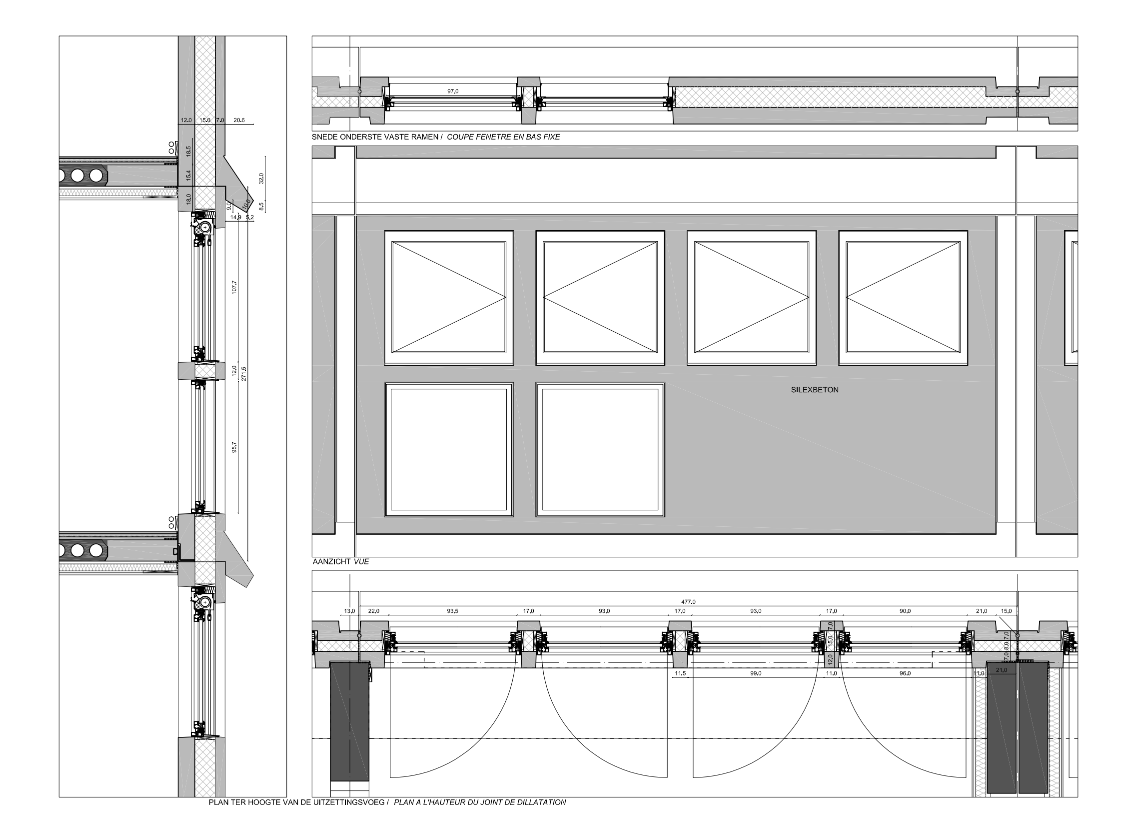
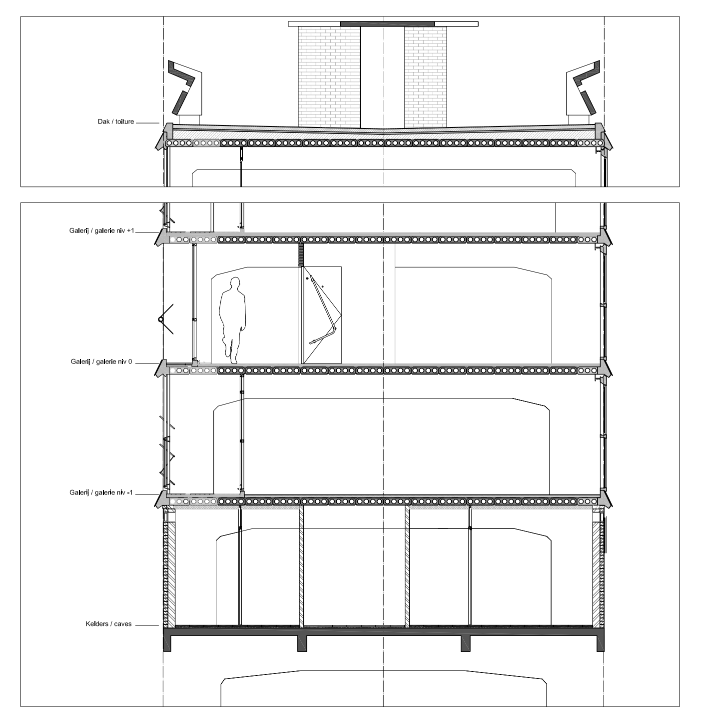
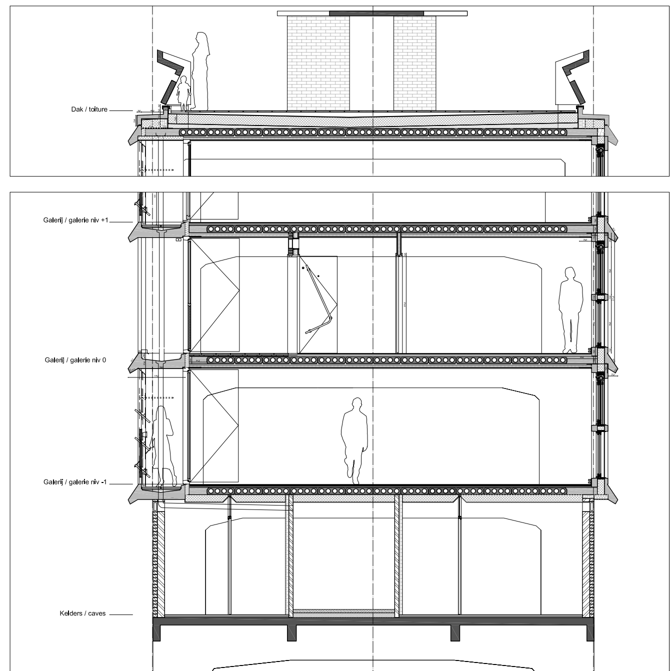



Figure 7 : Plan de détails des panneaux du projet de rénovation[3]




**Situation existante**




**Après rénovation**

Figure 8 : Coupes transversales[3]

Pour une question de budget par rapport à la performance et de facilité d'entretien, les châssis de fenêtres seront en aluminium à coupure thermique au lieu d'être en acier comme à l'origine.

**Les balcons**

Dans la situation initiale, les hourdis se prolongeaient en continu dans les balcons. Ces balcons seront démolis et reconstruits sans pont thermique. Ces balcons préfabriqués seront bétonnés dans des coffrages en acier à charnières pour que toutes les surfaces visibles soient lisses. Le nez des panneaux de façades se prolongera dans la rive des balcons pour former un élément continu en façade. Les balcons reposeront sur des consoles ancrées dans les portiques existants, balcon et dalle intérieure seront isolés l'un de l'autre par 10 cm de laine minérale (Fig. 8)[3].

## CONCLUSION

Apprécier l'œuvre et la méthodologie de l'architecte Willy Van Der Meeren tout en vouant un respect immuable au patrimoine d'après-guerre motivent l'engouement des auteurs de projet de cette rénovation dont les travaux d'une durée de deux ans ont débuté en septembre 2012.

## RÉFÉRENCES

**S. Van de Voorde - Le béton maigre dans le logement social après la Première Guerre mondiale. Expériences, innovations, hésitations**

[1](1923). *L'Habitation à bon Marché*, 3(10), 252
[2](1925). *Revue du Béton Armé*, 6(72), 47
[3](1923). *L'Habitation à Bon Marché*, 3(2), 33
[4](1920). *Conférence Nationale de l'Habitation à Bon Marché*. Bruxelles : UVCB.
[5](1920). Expérimentation de matériaux, appareils et procédés de construction. *La Cité*, 2(1), 15-17.
[6](1922). Maisons en Béton maigre monolithe. *L'Habitation à Bon Marché*, 2(8), 181-185.
[7]Eggericx, J. (1921). Les Logements à bon marché et les Matériaux nouveaux. *Revue du Béton Armé*, 3(3), 416-418.
[8]Gosseries, F. (1926). *L'Habitation à Bon Marché en Belgique*, Louvain : Société d'études morales, sociales et juridiques.
[9]Kuipers, M. (1987). *Bouwen in beton*, 's-Gravenhage: Staatsuitgeverij.
[10]Rabozée, H. et al. (1925). L'étude de l'emploi du béton maigre. *Les Annales des Travaux Publics de Belgique*, 78(4), 521-561.
[11]Smets, M. (1977). *De ontwikkeling van de tuinwijkgedachte in België*, Bruxelles : Mardaga.
[12]Smets, M. et al. (1985). *Resurgam*. Bruxelles : Gemeentekrediet.
[13]Van Damme, B. (1998). *De introductie van beton in de woningbouw.* KULeuven (mémoire fin d'études).
[14]Van de Voorde, S. (2011). *Bouwen in Beton in België (1890-1975). Samenspel van kennis, experiment en innovatie.* Université de Gand (thèse de doctorat), 2 v.

**J. I. Schiffmann - Le béton préfabriqué dans le bâtiment de la fin de la Seconde Guerre mondiale à nos jours. De la préfabrication fermée à la préfabrication ouverte**

[1] FIP (1998). *Planning and design handbook on precast building structures. Fédération Internationale de la Précontrainte.*
[2] Lewicki B. *Bâtiments d'habitation préfabriqués en éléments de grandes dimensions*. Éditions Eyrolles
[3] Document CBR
[4] Crédit photographique : images credited to The Daily Telegraph, 1968 (http://en.wikipedia.org/wiki/File:Ronan_Point_-_Daily_Telegraph.jpg)
[5] Bruggeling (1977). *Prefabricage in beton.* Elsevier
[6] CSTC (1970). *Recommandations pour le calcul et l'exécution des constructions industrialisées en béton*
[7] CSTC (1972). *Exemples d'application des Recommandations* CSTC.
[8] (2012). *Prévenir la destruction en chaîne sous l'effet d'actions accidentelles*. Revue Béton, 214 FEBE.
[9] (1975). *Guide des performances du bâtiment.* Bruxelles : Syndicat d'Études IC-IB
[10] Setesco
[11] CSTC NIT 118. *Calcul et exécution de l'assemblage des structures industrialisées.*
[12] Schiffmann J. (1975-1976). *Industrialisation de la Construction.* PUB ULB.

**Ch. Nys et J. de Moffarts - *Ieder Zijn Huis* : la préfabrication appliquée à un immeuble de logements sociaux. 1960 - 2014**

[1] Georges De Kinder
[2] Coll. WVDM Archives
[3] Origin Architecture & Engineering
[4] De Kooning M., Van Der Meeren. W(1997).(Proefschrift voorgelegd tot het behalen van de graad van Doctor in de Toegepaste Wetenschappen, richting Architectuur), Universiteit Gent
[5] De Kooning M., Ledent G., Nys. C., Pecheur B., De Moffarts J., Pourtois C., Van Der Meeren W. (2012). .CIVA - ORIGIN
[6] Verswijver K. (2007). (Meesterproef ingediend tot het behalen van de graad van burgerlijk ingenieur-architect onder promotorschap van Prof. Ann Verdonck, Prof. Jonas Lindekens en Prof. Charlotte Nys), Vrije Universiteit Brussel.

# 6. LES VOILES MINCES EN BÉTON ARMÉ

Dans l'histoire des structures en béton armé, un type nouveau apparaît dans les années 1920 pour couvrir des halls d'industriels, des hangars d'aviation et des espaces publics tels que des marchés : il s'agit du voile en béton armé de faible épaisseur (6 cm) qui permet, par sa rigidité de forme, de franchir de grandes portées sans appui intermédiaire. Le développement des formes de ces structures dans les années 1920-1930 est dû à un nombre restreint d'ingénieurs en Allemagne, en France et en Espagne. Ils produisent en quelques années des constructions dont beaucoup ont atteint le statut d'icône de l'ingénierie. La période de reconstruction en Europe qui suit la Seconde Guerre mondiale favorise les techniques et les structures économiques en matériaux. L'utilisation à grande échelle des voiles minces en béton armé se répand pour couvrir des halls de stockage, des usines ou des ateliers comme, par exemple, les hangars construits au port d'Anvers par la société SETRA (C. Wets et A. Paduart) en 1948. Peu à peu, les architectes s'approprient le langage formel des voiles minces en béton armé, dont l'apogée se situe à la fin des années 1950. Une forme de voile mince qui a été particulièrement prisée, tant par les ingénieurs que les architectes, est le paraboloïde hyperbolique. En Belgique, le Professeur André Paduart de l'ULB en a conçu plusieurs en collaboration avec des architectes.

## GENÈSE DES VOILES MINCES EN BÉTON ARMÉ

**Bernard Espion**

### INTRODUCTION

On entend ci-dessous par « voiles minces en béton armé » des structures spatiales dont l'épaisseur est très faible par rapport aux deux autres dimensions (le rapport épaisseur/portée est typiquement moins, voire beaucoup moins, que 1/100) et dans lequel l'état de contrainte est essentiellement membranaire. Même si l'on peut trouver quelques constructions d'avant les années 1920 qui pourraient peut-être entrer dans cette définition, il est généralement admis que l'aventure constructive des voiles minces en béton armé commence au début des années 1920 en s'accompagnant de développements de modèles mathématiques spécifiques d'analyse du comportement structural pour permettre un dimensionnement rationnel. Auparavant, les seuls modèles dont disposent les ingénieurs pour dimensionner les constructions en béton armé sont le fonctionnement unidimensionnel en poutre droite et en arc, ce qui induit la typologie structurale depuis les origines du béton armé. Or, il s'agit ici d'aborder le fonctionnement de surfaces minces qui est tridimensionnel. C'est ce comportement qui va permettre d'atteindre de grandes portées de couverture avec une économie de matière et de poids considérable par rapport aux solutions constructives antérieures.

En tout point d'une surface, il est possible de tracer sur la surface deux lignes perpendiculaires suivant lesquelles les courbures (la courbure est l'inverse du rayon de courbure) sont respectivement maximale et minimale. On appelle ces courbures extrêmes les courbures principales. La courbure gaussienne est le produit des courbures principales et il est d'usage de classer les surfaces suivant le signe de la courbure gaussienne : positive, nulle ou négative. Chronologiquement, c'est dans cet ordre que les voiles minces vont apparaître. Cette courte note a pour objet de retracer à grands traits l'évolution des couvertures en voile mince de béton armé dans les années 1920-1930. Ne seront pas reprises ici les constructions en voiles minces autres que les couvertures, telles que, par exemple, les silos ou les réfrigérants atmosphériques.

### DÔMES ET PLANÉTARIUMS

En 1922, l'ingénieur Walter Bauersfeld (1879-1959) a terminé le développement mécanique et optique du projecteur pour planétarium sur lequel il travaille chez le constructeur d'instruments optiques Zeiss de Iéna depuis 1912. Il lui faut alors imaginer l'écran sur lequel projeter la voûte céleste. Il conçoit un treillis spatial métallique tridimensionnel prenant la forme d'un dôme hémisphérique. Le treillis est constitué de 4 000 barres en acier, de section 8 mm sur 20 mm d'environ 60 cm de long, reliées par des nœuds : il constitue le premier dôme géodésique de l'histoire des structures. La réalisation de l'écran/voûte céleste sur cette ossature, à la géométrie rigoureusement contrôlée, naît de discussions avec l'entreprise

Figure 1 : Ossature en treillis 3-D du prototype du planétarium et dôme en béton projeté (Usine Zeiss, Iéna, 1922-1923)[1]





de construction Dyckerhoff et Widmann de Wiesbaden qui propose de projeter du béton gunité à travers l'ossature métallique sur un coffrage mobile en bois de 3 m par 3 m. Le prototype qui est réalisé est un dôme en béton de 16 m de diamètre et de 3 cm d'épaisseur, dont l'armature est principalement constituée du treillis métallique, construit sur le toit de l'usine Zeiss à Iéna en 1922-1923 (Fig. 1).

Ce système pour construire des coupoles est breveté sous le nom Zeiss-Dywidag (Z-D) en 1923. Le bureau d'études de Dyckerhoff et Widmann est alors dirigé par Franz Dischinger (1887-1953), qui va, en une dizaine d'années, développer énormément les applications du brevet Z-D pour réaliser quantité de structures en voile mince de béton. Il sera pour cela entouré d'ingénieurs remarquables, en particulier d'Ulrich Finsterwalder (1897-1988). Pour les ingénieurs de cette équipe, il est important que le dimensionnement de ces structures novatrices soit rigoureusement fondé, ce qui conduit au développement de théories très mathématiques et à des essais sur modèles de vérification.

Figure 2 : Planétarium de Bruxelles (1935)[2]



La première application du brevet Z-D, en 1923, est une coupole très surbaissée de 40 m de diamètre, de 8 m de flèche, et de 6 cm d'épaisseur, pour couvrir les ateliers de l'usine Schott à Iéna. Le treillis Z-D y est toujours noyé dans le béton. La deuxième application bien connue est, comme prévu à l'origine du développement du système Z-D, le planétarium d'Iéna (1925). Mais, à la différence du dôme prototype, il se compose de deux coques : la coque intérieure est construite comme la coque prototype, avec le treillis noyé ; mais ce qui est intéressant, c'est maintenant la coque extérieure de protection, qui est un dôme en béton armé de 25 m de diamètre et de 6 cm d'épaisseur, et son armature est une armature ordinaire. Plusieurs planétariums avec dôme en voile mince de béton seront rapidement construits dans les années qui suivent, en Allemagne et à l'étranger, dont un à Bruxelles - l'Alberteum - pour l'Exposition universelle de 1935 (Fig. 2). Le dôme original du planétarium de Bruxelles, détruit en 1968, faisait 23,5 m de diamètre et 5 cm d'épaisseur.

## VOÛTES EN BERCEAU

Mais les dômes hémisphériques et coupoles surbaissées (surfaces à courbure gaussienne positive) ne sont pas des formes en plan intéressantes pour couvrir rationnellement des espaces industriels ou civils, pas plus que le treillis Z-D, très coûteux, n'est une armature économique et rationnelle pour armer des voiles minces en béton. C'est en réfléchissant aux applications et aux potentialités du brevet Z-D que Bauersfeld, Dischinger et ses collaborateurs en viennent alors à ce qui sera l'application majeure du brevet Z-D : la voûte cylindrique en berceau longue, où le très coûteux treillis Z-D ne sert plus que de cintre (réutilisable) pour soutenir le coffrage. Les caractéristiques élémentaires de la voûte en berceau Z-D type (Fig. 3) sont : plan rectangulaire, simplement supportée sur colonnes

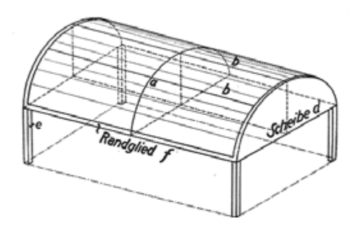


Figure 3 : voûte cylindrique en berceau Z-D[3]


Figure 4 : Coupole du marché de Leipzig (1929)[4]

aux quatre coins du rectangle, extrémités rigidifiées par des tympans ou diaphragmes, et poutres de rives longitudinales aux retombées de la voûte. Ainsi conçue, une longue voûte en berceau fonctionne sensiblement comme une poutre. La première application importante, et largement diffusée dans la littérature technique allemande et étrangère, est la couverture (en 1927) du marché de Francfort sur le Main par 15 voûtes Z-D accolées de 37 m de portée et de 7 cm d'épaisseur, permettant une surface couverte de 220 m par 50 m sans appuis intermédiaires.

Dischinger imagine ensuite, un peu à l'instar des voûtes sur croisée d'ogive, de construire pour le marché de Leipzig (1929) des coupoles polygonales obtenues par l'intersection de voûtes cylindriques. À Leipzig, les deux dômes construits ont 71 m d'ouverture. Pour une portée même légèrement plus grande, leur masse n'est plus que le tiers de celle du dôme à nervures dit « du Centenaire » construit à Breslau (Wroclaw) avant la Première Guerre mondiale.

La voûte en berceau « longue » est une forme structurale qui naît spécifiquement avec les développements du brevet Z-D. Elle ne doit pas être confondue avec les voûtes en berceau « courtes », dans lesquels le rapport portée/longueur est voisin de l'unité, et dont le fonctionnement structural, qui se rapproche de celui des arcs plans, est tout à fait différent. À la même époque (1928-1929), la voûte cylindrique « courte » est le type de voûte mince (7 cm d'épaisseur) en berceau, raidie à l'extrados par des nervures en saillie, utilisé par Eugène Freyssinet (1879-1962) pour concevoir les halles du Boulingrin à Reims (Fig. 5).

Une publicité importante pour le système Z-D hors Allemagne est donnée à l'occasion du 1er congrès international du béton armé qui

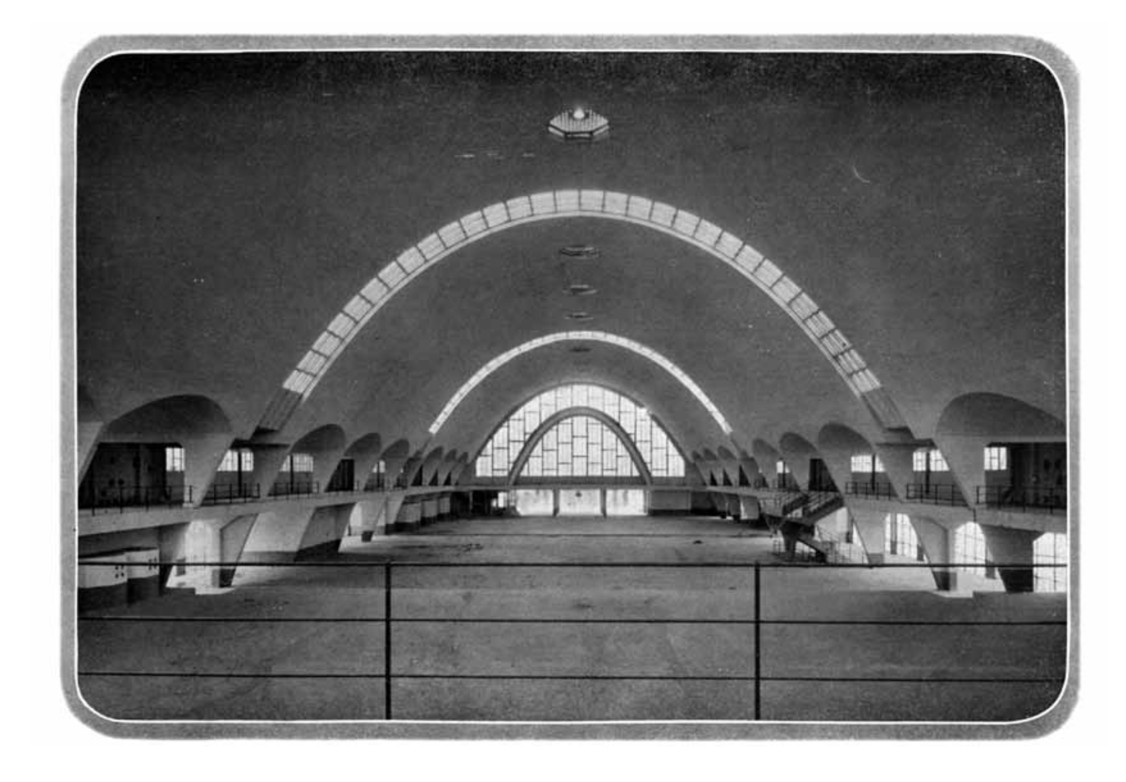

Figure 5 : Marché couvert de Reims (1929)[5]



Figure 6 : Magasin à charbon des Forges de la Providence à Marchienne-au-Pont ; cintre en treillis double Z-D[3]

a lieu à Liège en septembre 1930. Dischinger n'y a pas participé personnellement, mais y a fait exposer devant l'élite internationale des ingénieurs les possibilités des voiles minces en béton. Sa communication, initialement en allemand, est traduite en français pour être reproduite dans la revue « La Technique des Travaux », publiée à Liège par la Compagnie internationale des pieux Franki, qui prend soin de souligner qu'elle jouit des droits exclusifs d'exploitation du brevet Z-D pour la Belgique et le Congo. On y découvre ainsi que des voûtes minces en béton ont été construites par Franki en utilisant le treillis Z-D comme support de coffrage pour réaliser les toitures du parc à charbon aux Forges de la Providence à Marchienne-au-Pont (Fig. 6) et le magasin à sulfate d'ammoniaque de la Carbochimique (UCB) à Tertre. Il ne s'agit cependant pas de voûtes en berceau longues, mais plutôt de voûtes cylindriques en berceau « court », fonctionnant, à l'instar des voûtes du Boulingrin, comme des arcs parallèles, donc de façon plane. Il s'agit très probablement des premiers voiles minces en béton de type Z-D construits en Belgique.

## CONOÏDES ET PARABOLOÏDES HYPERBOLIQUES

Le voile mince en conoïde est une invention, brevetée en 1927, de l'ingénieur Eugène Freyssinet vers la fin de sa codirection de l'entreprise Limousin-Procédés Freyssinet qu'il quitte début 1929 pour se lancer à son compte dans l'aventure du développement de la technique du béton précontraint. À partir de 1928, l'entreprise Limousin-Procédés Freyssinet construit de grandes séries de conoïdes identiques pour produire de longs ateliers en sheds à éclairage zénithal à Bagneux, Dammarye-les-Lys (Fig. 7), Aulnay-sous-bois, Fontenay-sous-bois... La portée est typiquement de l'ordre de 17,5 m avec une épaisseur de hourdis de 5 cm. L'économie du procédé réside en une construction répétitive des baies grâce à un cintre mobile.

Mais Freyssinet n'est pas le seul ingénieur à s'intéresser aux voiles minces en béton en France à ce moment. Il faut particulièrement mentionner l'ingénieur Bernard Lafaille (1900-1955) qui conçoit également de très élégants sheds conoïdes, même un peu avant Freyssinet[16]. Lafaille est souvent considéré, avec l'auvent expérimental constitué de voiles de 12,5 m en porte-à-faux et de 5 cm d'épaisseur qu'il construit à Dreux en 1933[14], comme le père du voile mince en forme de paraboloïde hyperbolique[8]. Les voiles minces

Figure 7 : Sheds à éclairage zénithal en conoïdes type Freyssinet[6]



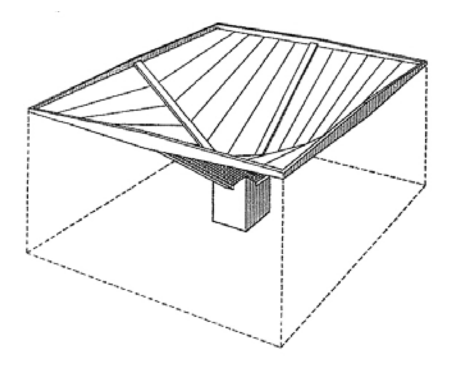




Figure 8 : Quatre PH en parapluie[7]. Application de cette disposition classique à Tournai[4]

en forme de paraboloïde hyperbolique (PH), surface gauche (courbure gaussienne négative) doublement réglée, connaîtront la faveur des architectes et des ingénieurs surtout dans les années 1950. *Stricto sensu,* les voiles de l'auvent de Dreux ne sont pas des PH mais des conoïdes.

La théorisation du fonctionnement structural membranaire du PH est surtout le fait de Fernand Aimond (1902-1984), ingénieur au Ministère de l'Air, dont le programme d'équipement des aérodromes, tant civils que militaires, va dans les années 1930 donner lieu à de nombreuses recherches constructives en matière de structures légères pour réaliser des hangars pour avions. On doit en particulier à Aimond la publication dans son mémoire de 1936 de toute une série de dispositions « types » d'agencement de voiles minces en PH pour réaliser des couvertures[7]. Elles seront souvent reproduites (dans la littérature) et réalisées (en pratique) : l'auvent « parapluie » sur le site des anciennes cimenteries Dapsens à Tournai (Fig. 8), probablement construit dans les années 1950, est une illustration type d'une figure du mémoire de Aimond.

## UNE BRILLANTE SYNTHÈSE DES FORMES

Il serait impensable de clôturer ce survol des débuts des voiles minces en béton armé sans mentionner l'œuvre de l'ingénieur espagnol Eduardo Torroja (1899-1961) qui, en un très court laps de temps, réalise trois structures majeures exploitant magistralement les nouvelles possibilités constructives et architecturales offertes par cette nouvelle technique :

- le marché d'Algésiras (1933), un dôme très surbaissé de 48 m de diamètre (courbure gaussienne positive) et 9 cm d'épaisseur reposant sur huit piliers, où l'ingénieur démontre une maîtrise dans le traitement des conditions de bord (Fig. 9) ;

- la couverture par deux longs voiles minces en berceau (courbure gaussienne nulle) du court de balle pelote du Fronton des Récollets à Madrid (1935) ; la surface couverte sans appui intermédiaire est 55 m par 32,5 m (épaisseur 8 cm) (Fig. 10) ; la complexité de cette structure, beaucoup plus grande que

Figure 10 : Couverture du court « Fronton Recoletos » (Madrid, 1935)[9]



Figure 9 : Le marché couvert d'Algésiras (1933)[8]



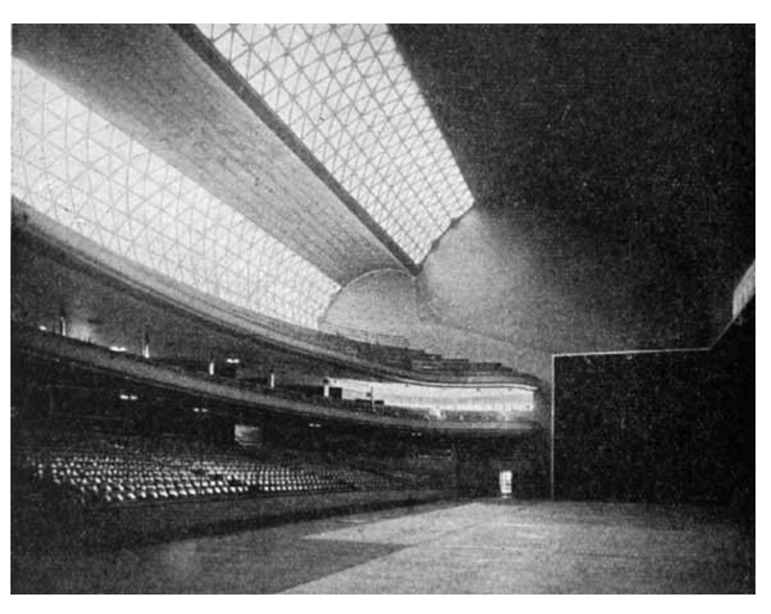


Figure 11 : Tribunes de l'hippodrome de la Zarzuella (Madrid, 1935-1941)[4]



celle des voiles Z-D, a justifié un impressionnant programme d'essais sur modèle ;

- la couverture des tribunes de l'hippodrome de la Zarzuella (1935-1941) par un auvent constitué de segments d'hyperboloïdes à une nappe (courbure gaussienne négative), d'axe horizontal, de 13 m en porte-à-faux à partir des appuis, avec épaisseur variable de 15 à 5 cm ; elle inaugure une disposition qui sera maintes fois reproduite (Fig. 11).

Dans ces structures, à la fin de la période évoquée ici, Torroja atteint une élégance structurale et une qualité de construction souvent soulignées.

## QUELQUES COUVERTURES EN PARABOLOÏDE HYPERBOLIQUE D'ANDRÉ PADUART

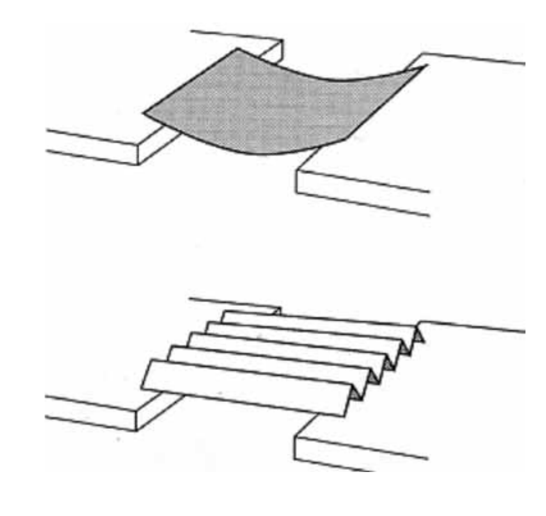
**Michel Provost et Bernard Espion**

Les voiles minces, peu consommateurs de matière mais très consommateurs de main-d'œuvre, apparaissent dans les années 1930, époque où les matériaux sont chers et la main-d'œuvre bon marché.

C'est la forme globale des voiles minces en béton armé qui leur confère résistance et raideur. Le voile mince forme un tout : il n'y a pas de distinction entre éléments porteurs et éléments portés. Dans une couverture d'espace courante en béton armé, les dalles s'appuient sur les poutres. Dans un voile plissé, c'est le plissé de la dalle qui forme les poutres et assure résistance et raideur. (Fig. 1)

Il existe plusieurs types de voiles minces en béton armé : les voiles plissés, les voiles à simple courbure, comme les voûtes en berceau, et les voiles à double courbure. Ces derniers se divisent principalement en deux catégories :

Figure 1 : Voiles plissés en béton armé [1]



les coupoles pour lesquelles les centres des deux courbures principales de la surface sont du même côté de la surface et les paraboloïdes hyperboliques (PH) pour lesquels ces derniers sont de part et d'autre de celle-ci. Les voiles minces en PH ont été particulièrement popularisés dans les années 1950 au Mexique par l'ingénieur architecte Félix Candela qui en a réalisé des centaines en de multiples variations.

Le nom d'André Paduart (1914-1985) est en Belgique, tout au moins, indissociable du domaine des voiles minces en béton armé. De 1944 à 1954 il est directeur technique de la société Société d'Études et de Travaux (SETRA), entreprise belge de premier plan, innovatrice dans le domaine du béton armé et précontraint qui réalise plusieurs ouvrages en voiles minces. Dès la première heure, il est membre actif de l'*International Association for Shell Structures* (IASS) fondée à Madrid par E. Torroja en 1959. Il est président de cette association de 1971 à 1980. En 1961 il publie un ouvrage essentiel au sujet des voiles minces[2]. À partir de 1965, il est conseiller de la société HAMON pour ce qui est des tours de réfrigération en hyperboloïde de révolution. Au travers de ses réalisations, le professeur Paduart a exploré quasiment toutes les formes de voiles minces et les a appliquées à différents types d'ouvrages, parfois relativement modestes, parfois exceptionnels[3]. Il a utilisé des voûtes en berceau dans des hangars au port d'Anvers ou pour l'aviation, des voiles plissés à l'église d'Harelbeke et à la tribune de l'hippodrome de Groenendael et des PH dans plusieurs cas comme nous le verrons ci-après. Il est aussi l'un des créateurs de la Flèche du génie civil qui, avec ses près de 80 m de porte-à-faux, était un fleuron de l'Expo 58 ; dans cet ouvrage exceptionnel, il a utilisé les voiles minces sous forme d'une coupole et d'un voile plissé.
Avant d'analyser quelques couvertures en PH conçues par le professeur Paduart et destinées à couvrir différents types d'espaces, résumons les propriétés essentielles des PH en béton sur plan rectangulaire.

Les PH sont des surfaces doublement réglées, c'est-à-dire qu'elles peuvent être obtenues par le déplacement d'une génératrice rectiligne sur des directrices également rectilignes et qui lui sont perpendiculaires. Cette propriété rend leur coffrage et donc leur réalisation relativement simple. Le PH représenté aux figures 2a et 2b a deux points hauts (H) et deux points bas (B). Des efforts de compression se développent dans des voûtes et des efforts de traction de même intensité dans des chaînettes qui leur sont orthogonales. Le voile sollicite les rives suivant leur direction ; elles sont dès lors le siège d'efforts principalement de compression croissant des points hauts vers les points bas où doivent normalement se situer les colonnes. Les composantes horizontales des efforts arrivant aux points bas sont soit équilibrées par ceux d'un PH adjacent, soit reprises par un tirant ou une culée. Par rotation autour d'un axe passant par les deux points bas (B) ou les deux points haut (H), trois des quatre sommets du PH peuvent être amenés dans un même plan horizontal. Ce changement de position dans l'espace est sans influence sur l'orientation et l'intensité des efforts dans la structure.

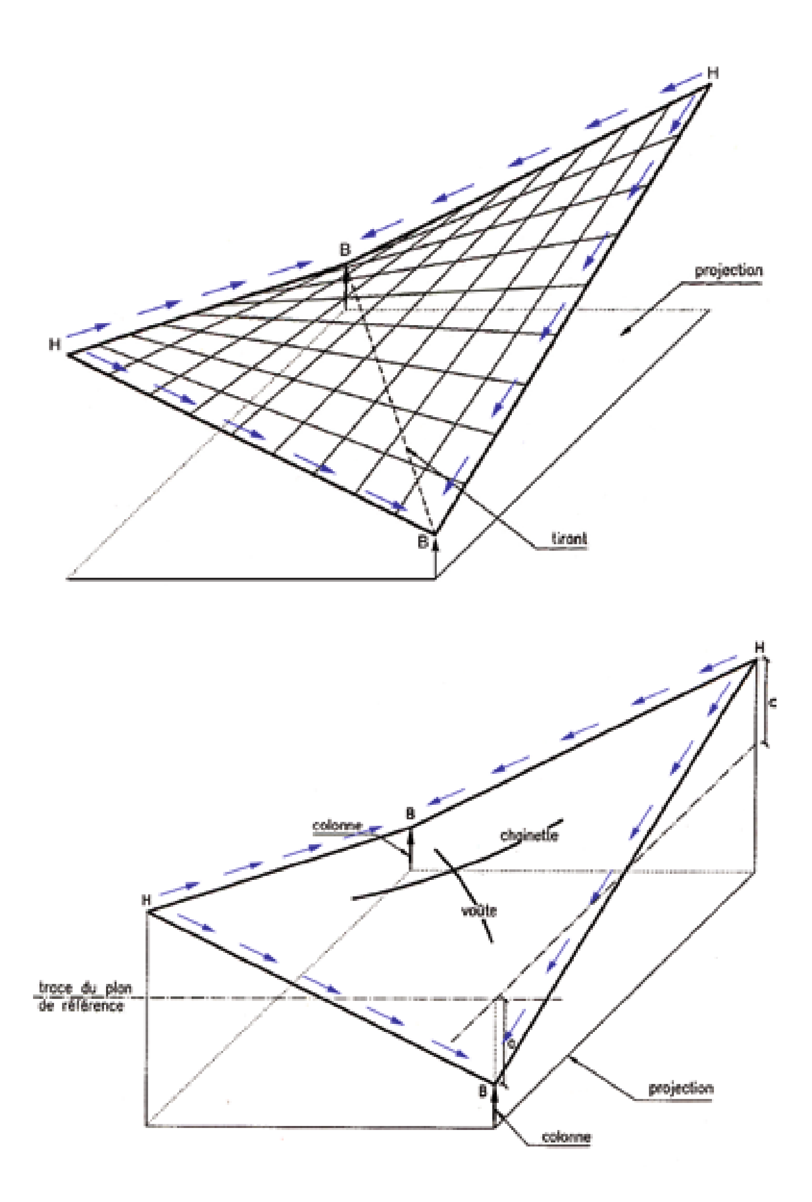



Figure 2a : Paraboloïde hyperbolique sur plan rectangulaire - Directrices et génératrices[4]

Figure 2b : Paraboloïde hyperbolique sur plan rectangulaire - Voûtes et chaînettes[4]



Figure 3 : Garage Renault Anderlecht[5]

Un premier exemple est constitué par la couverture en assemblage de PH du **Garage Renault à Anderlecht** (Architecte : A.J. De Doncker).
La couverture de ce garage terminée en 1963 est composée d'un ensemble de groupes de quatre PH de 6 cm d'épaisseur (Fig. 3, 4). Pour chacun des 4 PH, par rotation autour d'un axe passant par les points hauts (H), un des points bas a été amené au même niveau que les deux points hauts. Ce point (C) est le centre de la structure vers lequel les efforts dans les rives intérieures convergent et s'équilibrent. (Fig. 4a et 4b)

Cette disposition permet une entre-distance de colonnes double de la dimension des PH. Ici les colonnes sont éloignées d'environ 18 m dans les deux directions.

Chacune des huit classes du **Jardin d'enfants de la rue des Fleuristes à Bruxelles** (Architecte R. Courtois AUA *ca* 1975), rectangle de 9,6 m sur 7,2 m, est couverte d'un PH de 6 cm d'épaisseur.

Par rotation autour d'un axe passant par les deux points bas (B), un des points hauts du PH a été ramené dans le plan horizontal contenant les deux points bas, trois angles de la surface se retrouvant donc dans le même plan horizontal. Les poussées horizontales aux points bas (B) sont reprises par un tirant en acier. Cette solution élégante permet un éclairage zénithal de la classe. (Fig. 5a et 5b)

Dans ces deux premiers exemples, l'épaisseur moyenne de béton considérant les poutres de rive de ces toitures est d'environ 8 cm soit un poids approximatif de 2 kN/m². Le recours à une couverture plane en béton armé ou précontraint aurait conduit à une consommation de matière plus importante.

**Le complexe sportif de Genk** (Architectes I. Isgour et H. Montois, 1975) d'une surface d'environ 2 300 m² (hexagone allongé de 73,8 m de longueur et de 36,0 m de largeur)[7] est couvert par un ensemble de cinq PH en béton armé de 7 cm d'épaisseur (Fig. 6a et 6b). Les poutres de rive des PH situées sur la ligne médiane de cet ensemble forment un grand arc polygonal qui s'appuie sur deux culées aux extrémités, les poussées horizontales sont reprises par un tirant en béton précontraint placé sous le bâtiment. Une troisième culée assure la stabilité horizontale de l'ensemble. Les points hauts (H) des 4 PH d'angle ouvrent l'espace de cette couverture.

Les poutres de rive de la toiture sont appuyées sur des colonnes métalliques en façade.

Figure 4a : Assemblage de 4 PH à 3 points hauts et un point bas - Perspective[6]

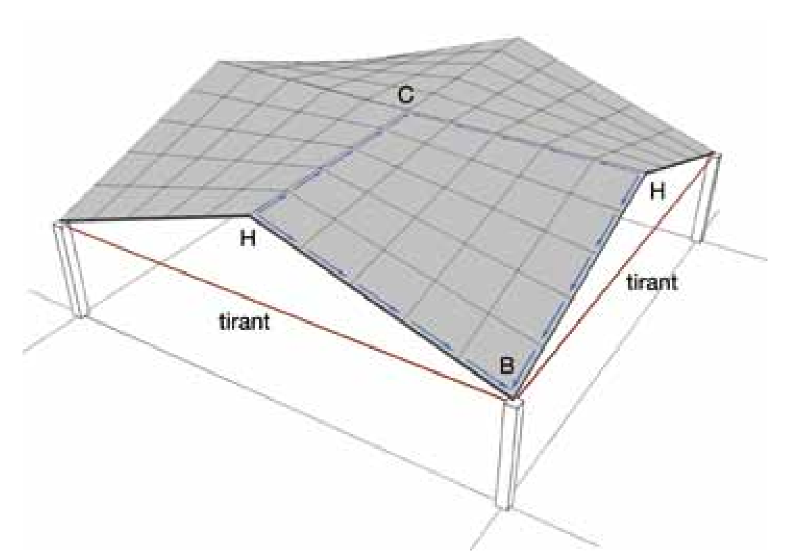
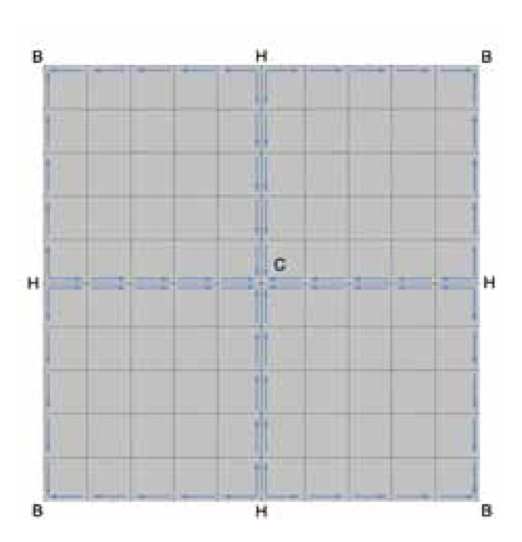



Figure 4b : Assemblage de 4 PH à 3 points hauts et un point bas - Vue en plan[6]



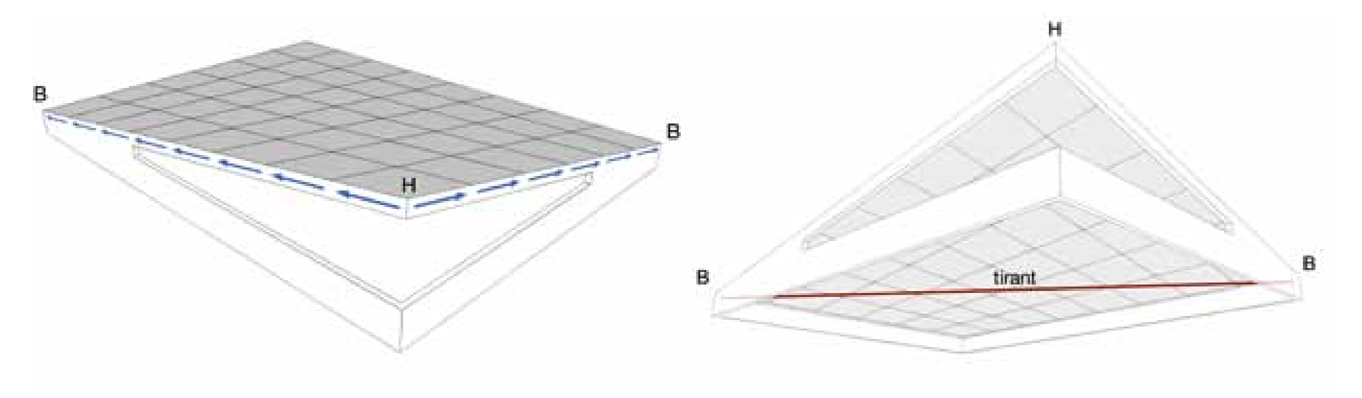



Figure 5a : PH couvrant chacune des classes - Vue de dessus[6]

Figure 5b : PH couvrant chacune des classes - Vue de dessous[6]

L'épaisseur moyenne de cette couverture (intégrant les poutres de rive mais non les culées et le tirant) de près de 74 m de portée est d'environ 15 cm soit un poids approximatif de 3,75 kN/m²

Dans cette même famille d'assemblage de PH conçus par le professeur Paduart, on doit également citer l'auvent de l'Institut de Sociologie de l'ULB (Architectes Robert Puttemans et Pierre Guillissen, 1966)[8] dans lequel le recours aux PH permet d'augmenter progressivement la hauteur du plissé en fonction du porte-à-faux.

Les trois premiers exemples d'assemblages de PH cités ci-avant nous montrent que ces ouvrages élégants sont relativement peu consommateurs de matière. C'est le coût de la main-d'œuvre lié à la mise en œuvre du coffrage qui a fait disparaître ce type de construction. Cette faible consommation de matière n'est pas sans intérêt aujourd'hui où l'on prend en compte un développement soutenable.

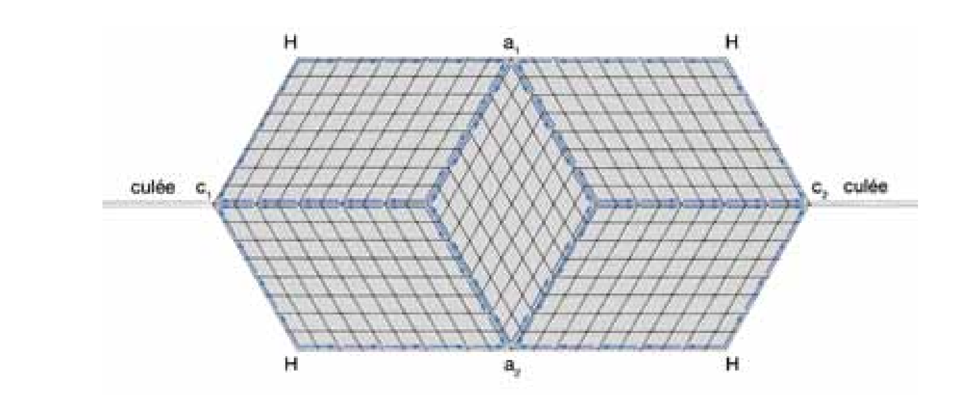



Figure 6a : Schéma de la toiture du complexe sportif de Genk - Vue en plan[6]

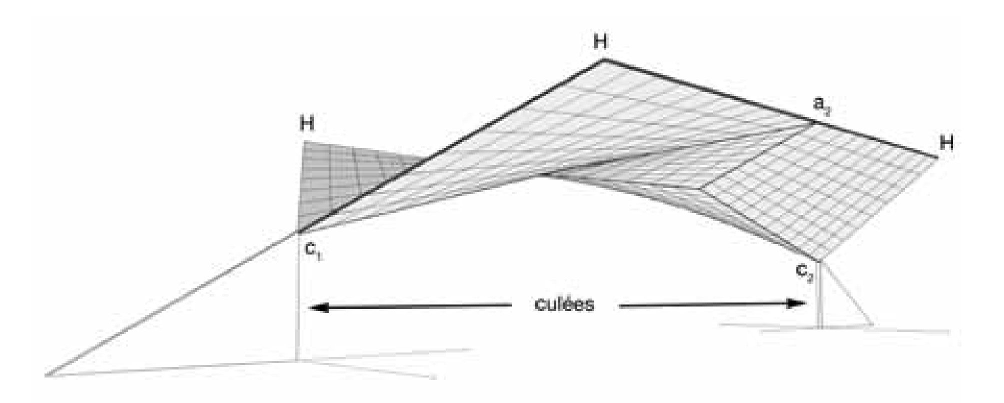



Figure 6b : Schéma de la toiture du complexe sportif de Genk - Perspective[6]

## RÉFÉRENCES

**B. Espion - Genèse des voiles minces en béton armé**
[1] www.physics.princeton.edu/~trothman/domes.html
[2] Crédit photographique : L'Épi
[3] Dischinger, F. (1931). Voûtes et coupoles minces en ciment armé, *La Technique des Travaux*, 99-121, 147-167.
[4] Crédit photographique : B. Espion
[5] Forestier, M. (1929). Les halles centrales de Reims, *La Technique des Travaux*, 81-90
[6] http://www.explorations-architecturales.com/data/new/fiche_90.htm
[7] Aimond, F. (1936). Étude statique des minces en paraboloïde hyperbolique travaillant sans flexion, Mémoires de l'AIPC, 4,1-112.
[8] Joedicke, J. (1963). *Les structures en voiles et coques*. Stuttgart : Karl Krämer Verlag.
[9] Torroja, E. (1937-1938). Le voile mince du "Fonton Recoletos" à Madrid, *Mémoires de l'AIPC*, 5, 343-361.
[10] Addis, B. (2007). *Building: 3000 years of design, engineering and construction*. London; New York: Phaidon, 480-499.
[11] Charlot, V., Truillet, J. (Dir.). (2012). *Les Halles du Boulingrin : 1920-2012*. Paris : Somogy Éditions.
[12] Dischinger, F. (1928). Schalen und Rippenkuppeln, *Handbuch für Eisenbetonbau*, Bd. VI, 4. aufl., Berlin : Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn,163-383.
[13] Forestier, M. (1928). Construction des halles centrales de Reims, *La Technique des Travaux*, 21-27.
[14] Lafaille, B. (1935). Mémoire sur l'étude générale de surfaces gauches minces, *Mémoires de l'AIPC*, 3, 295-332.
[15] May, R. (2012). Schalenkrieg. Ein Bauingenieur-Drama in neun Akten. *Beton- und Stahlbetonbau*, 107(10), 700-710.
[16] Nogue, N. (1999). Les surfaces gauches minces. Une aventure constructive des années trente, *Les Cahiers de la recherche architecturale et urbaine*, 2-3, 149-166.
[17] Paduart, A. (1961). *Introduction au calcul et à l'exécution des voiles minces en béton armé.* Bruxelles et Paris : CRIC et Eyrolles.
[18] Torroja, E. (1958). *The structures of Eduardo Torroja*. New York: F.W. Dodge Corporation.

**M. Provost et B. Espion - Quelques couvertures en paraboloïde hyperbolique d'André Paduart**
[1] Walther R, Treleani J. (1993). *Construire en béton*, 208. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes
[2] Paduart, A. (1961). *Introduction au calcul et à l'exécution des voiles minces en béton armé*. Centre information de l'industrie cimentière belge, Ed. Eyrolles, Paris
[3] Espion, B., Halleux, P., Schiffmann, J. (2003). Contributions of André Paduart to the art of thin concrete shell vaulting. *Proceedings of the First International Congress on Construction History.* Madrid : Instituto Juan de Herrera, Escuela Técnica Superior de Arquitectura Madrid, vol.II, 829-838.
[4] Provost, M. (2007) *Conception des ouvrages en béton*. Tome 2. Presses Universitaires de Bruxelles
[5] Anon. (1963). L'agence belge des automobiles Renault. *La Maison*, 19(7), 214-216, 230.
[6] Crédit photographique : ORIGIN Architecture & Engineering
[7] Paduart, A., Shiffmann, J. (1977). Couverture du complexe sportif de Genk. *La Technique des Travaux*, 365, 87-94.
[8] Attas, D & Provost, M (2011). *Bruxelles, sur les traces des ingénieurs bâtisseurs*, 49, 50, 78, 178, 180, 248, 278. CIVA-ULB-VUB

# 7. LE BÉTON ARMÉ, VECTEUR D'UNE ARCHITECTURE RENOUVELÉE

Au 20ème siècle, le béton armé est considéré comme le matériau de la modernité, c'est-à-dire celui par lequel l'expression architecturale a connu un renouvellement majeur. Juste avant la Première Guerre mondiale, les prémices de cette avant-garde se dessinent déjà au travers de projets tels le Théâtre des Champs-Élysées des frères Perret à Paris ou le schéma Dom-Ino de Le Corbusier ou encore les écrits de Gropius. La résistance du béton armé en a fait un matériau de prédilection pour couvrir de grandes surfaces libres, s'essayer à des toits-terrasses, réaliser des formes courbes mais aussi supporter de lourdes charges verticalement et horizontalement. Ses qualités de malléabilité et de finition de surface, notamment grâce à des techniques de préfabrication précise, l'ont rendu acceptable et même sculptural en façade. Ses performances mécaniques et physiques, dont celle de durabilité, s'améliorent encore de nos jours grâce à des recherches innovantes, ce qui permet de rêver à de nouvelles utilisations d'ordre fonctionnel et esthétique. Des exemples de la première moitié du 20ème siècle vous ont été présentés au chapitre 2. Le présent chapitre met en avant quelques réalisations belges hors du commun de la seconde moitié du 20ème siècle et du début du 21ème siècle : l'ancien siège social de la Banque Bruxelles Lambert, la maison Delsemme à Tilff, le crématorium *Hofheide* à Holsbeek, etc.

## LE BÉTON EN ARCHITECTURE, LE BÉTON COMME EXPRESSION ARCHITECTURALE

**Pablo Lhoas**

### INTRODUCTION

Même si c'est depuis bien plus d'un siècle que l'imaginaire et la pratique des architectes sont marqués par l'ingénierie, le 20ème siècle, siècle d'inventions et de développements techniques et industriels par excellence a vu se développer cette interaction à un niveau sans doute jamais atteint jusque-là.
Qu'il s'agisse des techniques (électricité, ascenseurs, ventilation, régulation de température...) ou des structures, l'ingénierie a de plus en plus de place (littéralement et métaphoriquement) dans l'architecture, certains - mauvais ? - esprits allant jusqu'à dire que les techniques ont pris une place prépondérante dans la construction... Elle est non seulement un moyen pour les architectes et les maîtres d'ouvrage de comprendre, de dompter et d'adopter les évolutions technologiques de plus en plus complexes, mais elle est devenue une source d'inspiration, un moteur du projet architectural, et n'ayons pas peur des mots, une raison des révolutions architecturales du 20ème siècle, et en particulier de ce que l'on nomme la Modernité. Dans cette dynamique, l'ingénierie structurale joue un rôle clef puisque sa matière fait, plus que toute autre, corps avec l'architecture, elle lui est consubstantielle.
Né - ou redécouvert - au 19ème siècle, le béton va occuper durant le 20ème siècle une place prépondérante qui permettra à des auteurs de renouveler fondamentalement la conception, le langage de l'architecture et de former la modernité architecturale, j'en veux pour preuve le dernier ouvrage de l'un des principaux historiens du Mouvement Moderne Rayner Banham "*A concrete Atlantis : U.S. Industrial building and European Modern Architecture*". Un nombre significatif des nouvelles conceptions architecturales du 20ème siècle sont donc liées à la compréhension particulièrement pénétrante, à l'usage brillant que certains auteurs vont faire de ce matériau en lui permettant de dépasser sa condition de matériau pour accéder à celui de principe qui autorise et appelle en même temps de nouvelles structures, de nouvelles dispositions, de nouvelles conceptions..., et formes architecturales.

### ANNIVERSAIRE DE L'AMBIGUÏTÉ

2013 pourrait être érigée en l'année anniversaire de ce mariage si fécond du béton et de l'architecture moderne, mais un mariage placé, dès le début sous le signe de l'ambiguïté. Cette histoire est en effet jalonnée de nombres d'équivoques, de malentendus entre la nature structurale d'une œuvre et ce qu'elle donne à voir autant dans le processus que dans l'objet construit. En effet, c'est en 1913 que Walter Gropius publie dans l'annuel du Deutscher Werkbund son très fameux article « **Le déve-**

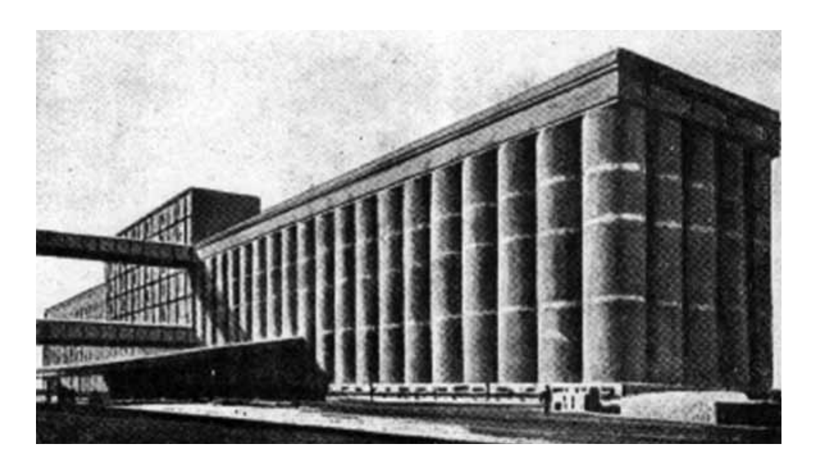


Figure 1 : *Grand Trunk Pacific elevator*, Fort William, Ontario, 1910, tel que repris en 1923 par Le Corbusier dans son ouvrage « Vers une architecture »[1]

loppement des constructions industrielles modernes » dans lequel il montre les photographies des silos à grains américains qui le fascinent (Fig. 1). Cet article, acte la naissance du regard moderne en architecture. Ce regard des architectes qui se détourne de l'histoire de l'architecture et se renouvelle en osant considérer (jusqu'à la fascination) les produits de l'industrie (constructions, trains, avions, paquebots, voitures…). Par ailleurs, ses illustrations auront une telle fortune critique qu'elles seront reprises par nombre des principaux acteurs du Mouvement Moderne : Le Corbusier, Erich Mendelsohn ou Bruno Taut… et citées à maintes reprises par les historiens du Mouvement Moderne.

Gropius écrit : «… *Dans la patrie de l'industrie, en Amérique, de grandes constructions industrielles sont apparues, dont la majesté étonne d'autant plus qu'elle est inconnue des meilleures constructions allemandes. Les silos à céréales du Canada et d'Amérique du Sud, les silos à charbons des grandes lignes de chemin de fer et les ateliers les plus modernes des monopoles industriels d'Amérique du Nord ont une puissance monumentale dont l'expression soutien presque la comparaison avec les constructions de l'Égypte ancienne. Leur visage architectural est d'une telle fermeté que le spectateur saisit sans ambiguïté devant une force si convaincante le sens de ces édifices. L'évidence de ces bâtiments ne découle pas de la supériorité matérielle de leurs dimensions gigantesques - ce n'est pas dans cette direction qu'il faut chercher la raison de leur présence monumentale -, mais c'est bien davantage le sens de ces grandes formes exactes autonomes, claires et nettes de leurs constructeurs qui s'exprime. Il y a là une sorte d'encouragement pour nous à rejeter cette nostalgie historique et ces scrupules de type intellectuel qui encombrent la création artistique européenne et en contrarient la spontanéité* ».

Il apparaît donc que les raisons de l'engouement de Gropius pour ces silos à grains sont multiples, et à certains égards ambiguës voire paradoxales. Elles témoignent de l'ambivalence du Mouvement Moderne lui-même. En effet, Gropius prétend tout à la fois à la rationalité, à la fonctionnalité… et à l'esthétique, aux sentiments. Il revendique en même temps des notions opposables, objectives et d'autres qui en appellent à la « pure » subjectivité. Il parle de « construction » pour ne pas la développer et se « réfugier » dans la plastique, dans le domaine des formes.

Le béton, comme matériau structural, n'échappe pas au cycle de tous les matériaux jouant ce rôle en architecture : d'abord utilisé comme élément structural dans une compréhension qui est encore celle des matériaux qui l'ont précédé, utilisé ensuite « per se », il connaît après une période de maturité durant laquelle on expérimente et tente de dépasser ses caractéristiques de base, puis/ou en même temps, élément semi-structural, voire élément décoratif dans un jeu de hiérarchies où se discutent, parfois se disputent ou se mêlent ces aspects structuraux et décoratifs. Nous nous attacherons ici essentiellement aux premiers en tentant d'identifier les moments, durant le 20ème siècle, où le béton joue un rôle significatif dans les évolutions de la pensée et de l'expression architecturale.

## QUELQUES JALONS

Tentons une synthèse de ces évolutions en identifiant une suite de projets-clefs :
**1913** : le projet des frères Perret pour le Théâtre des Champs-Élysées (Paris) et la singulière rationalisation géométrique à laquelle le recours au béton armé va conduire et la capacité des Perret de l'utiliser pour lui-même dans son essence, avec une certaine nudité et cela dans un contexte si symboliquement chargé.
**1914** : le schéma Dom-Ino de Charles Edouard Jeanneret (pas encore Le Corbusier) et la liberté que l'architecture acquiert de dissocier structure/définition des espaces et structure/définition de la façade. Ce schéma sera théorisé quelques années plus tard par le biais de ses « 5 points d'une architecture nouvelle », publiés en 1927 dans le n°17 de la revue « L'Architecture Vivante » et qui sont : pilotis, toits-jardins, plan libre, fenêtre en longueur, façade libre.
**1925-28** : le second Goetheanum de Rudolf Steiner (Dornach, Suisse), et les dévelop-

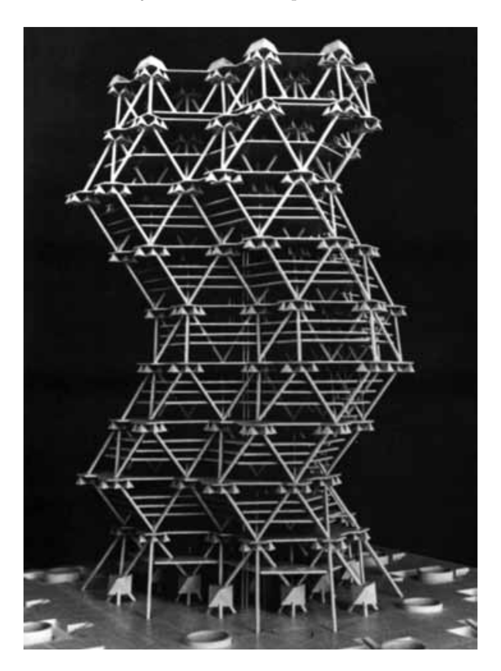
pements qu'il va impulser à l'architecture « organique », jouant du béton comme d'une masse omnidirectionnelle, une masse à couper, écharper, évider, modeler comme la terre glaise du sculpteur... qui renoue avec une vocation essentielle, primitive de l'architecture : protéger.

**1947-48** : la cité Radieuse de Le Corbusier est l'incarnation de la naissance du Brutalisme en architecture. Le Corbusier dira, dans une interview accordée en 1962 à Charensol : « J'ai eu l'occasion de faire, d'employer enfin le béton. Par la pauvreté des budgets que j'avais, j'avais pas un sou, et c'est aux Indes surtout que j'ai fait ces premières expériences. J'ai fait du béton brut et à Marseille je l'avais fait également de 47 à 52, du béton brut, ça a révolutionné les uns et j'ai fait naître un romantisme nouveau, c'est le romantisme du mal foutu. » De plus, le projet d'un ensemble de logements « alvéolaires » Roq et Rob dans lequel il déposera le brevet pour le système « 226/226/226 », annonce le structuralisme architectural.

Deux mouvements si puissants dans cette seconde moitié du 20ème siècle car mariant l'architecture et les arts à la sociologie, l'anthropologie et la découverte des cultures populaires (Claude Lévi-Strauss par exemple pour l'un et l'Independent Group de Londres de l'autre).

**1952-57** : le projet de « *City Tower* » par Louis Kahn & Anne Tyng (Philadelphie), qui à la suite des recherches de cette dernière sur les structures tétraédriques inspirées de la cristallographie, permet l'invention d'un nouvel archétype de gratte-ciel qui se veut comme une infrastructure libre polyédrique se fondant sur une nouvelle conception d'une structure tridimensionnelle en béton (qui est une sorte de transfert un peu cru en béton des structures tridimensionnelles en acier inventées par Konrad Wachsmann - chez qui A. Tyng collabora en 1944) (Fig. 2).

Figure 2 : Louis Khan & Anne Tyng, 1952-1957, « *City Tower* », Philadelphie[2]



**1952-57** : le siège de l'Unesco à Paris, œuvre de Breuer, Nervi et Zehrfuss dans lequel se réalise une harmonieuse synthèse architecture/ingénierie/construction autour du béton.

**1952** : « *The Golden Lane Idea* » à Conventry de Alison et Peter Smithson a cette ambition de renouveler l'urbanisme de la reconstruction post-guerre et les systèmes de construction afin d'utiliser les vertus de la préfabrication.

**1955** : la maison de bains du Centre communautaire juif de Trenton par Louis Kahn personnifie le structuralisme et utilise le sous-ensemble que constitue le module du bloc de béton préfabriqué avec un soin extrême et une grande perfection. Il connaîtra de très nombreuses suites (p.ex. Aldo van Eyck et l'Orphelinat à Amsterdam de 1955-1962 - ou encore Herman Hertzberger et le siège du Centraal Beheer d'Apeldoorn de 1968-72).

**1958** : Kenzo Tange provoque l'ire des modernistes « bon teint » en présentant sa préfecture de Kagawa au dernier Congrès International d'Architecture Moderne (C.I.A.M.) (1959, Otterloo) qui, tente - en béton - de revisiter l'architecture traditionnelle japonaise - en bois - et fait imploser le Mouvement Moderne en mettant à mal son universalisme humaniste en même temps que son fonctionnalisme structural.

**1958** : les prouesses structurales des paraboloïdes hyperboliques développées depuis une dizaine d'années atteignent leur paroxysme. Ces coques qui à la suite de l'église de Pampulha (O. Niemeyer, 1943), des structures d'Edouardo Torroja et Felix Candela au CNIT de La Défense (De Mailly, Camelot, Zerhfuss, architectes, et Nicolas Esquillan, ingénieur), vont faire florès. Quelques-unes seront réalisées lors de l'Exposition universelle de Bruxelles dont la plus célèbre est celle de Le Corbusier (pavillon Philips).

**1958-59** : la « Maison infinie » de Friedrick Kiesler présentée au Musée d'art moderne de New-York développe le potentiel plastique, l'affinement des coques en béton jusqu'à un extrême organique, presque régressif et « maladif » qui permet de reconsidérer radicalement la nature des espaces, des plans... de l'architecture.



Figure 3 : Pereira & Luckmann, 1959-61, « *The Theme Building* », Los Angeles[3]

**1957-60** : Niemeyer continue ses recherches sur le béton et, après avoir adopté le vocabulaire puriste, puis brutaliste de Le Corbusier, il tente très significativement, dans le projet de Brasilia, de jouer dans son architecture (Cathédrale de Brasilia par exemple) des principes structuraux plus aérés, ordonnés, effilés qui seront repris 40 ans plus tard encore par exemple par S. Calatrava.
**1957-62** : le terminal de la TWA d'Eero Saarinen. Singulier dans l'œuvre de Saarinen et dans la production générale de l'architecture. Très organique, très zoomorphe mais dans un trait extrêmement tendu, géométrisé/stylisé, une douceur peu courante pour des ouvrages en béton brut.
**1959-61** : un autre terminal d'aviation, à l'autre extrémité des États-Unis, joue de la structure avec audace et légèreté. Le « *Los Angeles Theme Building* » de Pereira & Luckmann, alors qu'il semble constitué d'un seul ordre structural, masque en fait, comme souvent, une structure mixte, complexe qui tente d'allier dans un dess(e)in « unitaire » les contraintes structurales, de faisabilité constructive et de coût… un entrelacs de quatre « muscles » qui troublent la limite entre colonne et poutre dans une élongation « élastique » à l'extrême rendue possible par quelques licences prises avec la pureté structurale (Fig. 3). Les architectes et leur ingénieur n'hésitant pas à jouer de structures hybrides (acier, béton, etc.) afin de réaliser cet édifice presque directement sorti d'un film de science-fiction (ici « La Guerre des Mondes », 1953, d'après l'œuvre de H.G. Wells).
**1962** : Sverre Fehn réalise le pavillon des pays nordiques dans les jardins de la Biennale de Venise. La toiture est particulièrement remarquable. Il parvient à dématérialiser une structure de poutres en béton en les affinant à l'extrême, en les multipliant. Ceci permet de franchir librement (sans point d'appui) de très grandes portées. Il est intéressant de constater qu'il réalise ici en béton ce qu'il avait construit de la même manière mais en bois quelques années plus tôt pour le pavillon norvégien de l'Exposition universelle de Bruxelles…
**1963-64** : la « fonction oblique » de Paul Virilio et Claude Parent radicalisera le potentiel spatial et expressif du béton en lui faisant retrouver ses racines enfouies que pourraient être les bunkers. Son œuvre la plus « complète » à cet égard est probablement l'église Sainte-Bernadette-du-Banlay à Nevers…
**1965** : l'architecte espagnol Francisco Javier Saenz de Oiza construit à Madrid l'immeuble « *Torres blancas* » qui est formé d'un enchevêtrement de cylindres, une succession, une concaténation de volumes saillants, très expressifs. Un organicisme tardif inspiré tant de Frank Lloyd Wright que des métabolistes japonais, du structuralisme et d'un désir d'efficacité constructive, fonctionnelle…
**1964-67** : l'ensemble de logements « Habitat67 » de Moshe Safdie se révèle être une ode à la préfabrication pour l'Exposition universelle de Montréal. Une très belle composition plastiquement puissante qui dépasse ce parti pris technologico-structural en le mariant avec ces ambitions méga-structurales si caractéristiques de cette époque[4].

Figure 4 : K. Kurokawa, 1970-72, « *Nakagin Capsule Tower* », Tokyo[5]





**1970-72** : l'immeuble « *Nakagin Capsule Tower* » de Kisho Kurokawa est si marquant car il réalise enfin (certes avec 15 ans de retard et à une échelle presque nanesque) l'utopie métaboliste qui prétendait régler les problèmes de la société du capitalisme tardif dans des ensembles urbains évolutifs inspirés du mode de développement des cellules biologiques (Fig. 4). Il a une puissance évocatrice si forte qui « bétonne » dans une tour sculpturale : préfabrication, impermanence, modularité, infini, nomadisme...
**1972-76** : Aldo Rossi dans son ensemble de logements du Gallaratese à Milan fait une œuvre charnière qui, usant de la force plastique d'une structure en béton nue, rigoureuse et systématique, est à la fois post-rationaliste et pré post-moderniste.
**1976** : les Maisons U de Toyo Ito et Azuma de Tadao Ando inaugurent l'époque du minimalisme qui se trouve si parfaitement mis en œuvre dans ces pures surfaces de béton banché. T. Ito est sans doute le plus radical qui libère la composition de cette « maison principe » insulaire, autocentrée, d'une nouvelle domesticité, par le recours à un « tout béton » absolu qui le rend si fascinant.
**1990-93** : la caserne des pompiers de l'usine Vitra (Weil am Rhein, Allemagne) de Zaha Hadid est l'une des réalisations les plus significatives et à certains égard paradoxale d'une construction (en béton) déconstructiviste ; Zaha Hadid qui tentera (et tente) à de nombreuses reprises et par exemple dans le centre scientifique Phaeno de Wolfsburg (2000-2005) de (re)nouer avec les expérimentations sur la masse en béton « spiralée » (au sens figuré) de Marcel Breuer ou d'un Gordon Bunshaft du musée Hirshorn de Washington (1969-74).
**2002-08** : le stade national de Pékin des architectes suisses Herzog & de Meuron, de l'artiste chinois Ai Weiwei et des ingénieurs du bureau Arup sous la conduite de Cecil Balmond nous questionne (comme le faisait le « *Theme Building* » - cf. *supra*). Il érige la structure en un ordre si déterminant pour l'architecture qu'il se suffit à lui-même. Un ordre qui pour exister dans sa complétude doit s'accommoder d'une certaine impureté. En effet, les éléments qui forment les parois du « Nid » sont structures et pas, en béton, et pas, peints et pas... une licence qui peut faire bondir.
**2004** : Toyo Ito renouvelle le sens structural du béton dans son immeuble « Tod's » d'Omotesando à Tokyo en faisant de la structure repoussée en façade ce motif pratiquement figuratif d'arbres.
**2008-2010** : le curieux « *1111 Lincoln Road* » (Miami) des architectes Herzog et de Meuron reconsidèrent nombre d'à priori structuraux et typologicofonctionnels en recourant au béton (Fig. 6). Ce curieux édifice est pratiquement « réduit » ou élevé au rang d'infrastructure dans laquelle sont logées crûment, en révisant les hiérarchies classiques, parkings, logements et magasins de très grand luxe.



Figure 6 : Herzog et de Meuron, 2005-2010, *1111 Lincoln Road*, Miami[7]

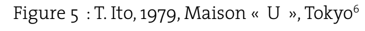


Figure 5 : T. Ito, 1979, Maison « U », Tokyo[6]



## ET QU'EN EST-IL EN BELGIQUE?

Malheureusement durant cette période, la Belgique occupe plutôt une position de « spectateur » par rapport aux principales évolutions de l'architecture y compris celles qui concernent les relations architecture/structure (en béton). En fait, ce seront même des réalisations d'auteurs étrangers qui symboliseront le mieux ces moments les plus significatifs de l'usage du béton en Belgique : de la passerelle Mativa d'Hennebique en 1905 à Liège, aux coques PH de Le Corbusier et Y. Xenakis pour le Pavillon Philips à l'Exposition universelle de Bruxelles en 1958, en passant par le siège de la

Banque Lambert de Skidmore Owings et Merill de 1965… Au risque de paraître - exagérément ? - négatif, je crains de devoir constater que la majorité des œuvres d'auteurs belges seront plutôt des « succédanés », certes parfois réussis, de ce qui se joue de plus profond dans l'architecture internationale. Mais la Belgique n'est pas le lieu de l'innovation, de l'inventivité… dans ces domaines.

## CONCLUSION

Cette « revue » de l'histoire récente de l'architecture par le biais de la question structurale et plus précisément encore du matériau béton montre combien il a été déterminant. Cette influence dépasse l'échelle, la fonction, le lieu des projets. Elle concerne en fait l'essence même de l'architecture. Elle se fait sentir dans les modes de penser l'architecture au-delà de ses seuls aspects constructifs et structuraux. Le recours à ce matériau et son usage témoigne très clairement des enjeux de l'architecture à chaque époque : du productivisme de l'après-guerre, au brutalisme, du structuralisme au métabolisme, du néo-rationalisme au postmodernisme, du déconstructivisme aux minimalismes, aucune tendance de l'architecture récente qui ne se construit pas (ou se déconstruit) grâce à la compréhension transitoire et relative du béton.

# LE DÉVELOPPEMENT DU BÉTON ARCHITECTONIQUE EN BELGIQUE. DU FONCOLIN AU CBR

**Stephanie Van de Voorde**

En 1961, l'historien de l'architecture américain Kidder Smith fait le bilan de *The New Architecture in Europe*. Un des rares bâtiments en Belgique valant la peine d'être mentionné fut l'immeuble de bureaux Foncolin à Bruxelles, conçu par André Jacqmain pour la compagnie d'assurance « Fonds Colonial des Invalidités » (1955-58, démoli en 2001) (Fig. 1). Vanté par toute la presse spécialisée de l'époque comme modèle pour la nouvelle architecture européenne de bureaux, le bâtiment peut être considéré comme le début du développement du « béton architectonique » en Belgique.

L'architecte Jacqmain conçut le bâtiment Foncolin en collaboration avec l'architecte Victor Mulpas, le concepteur de meubles Jules Wabbes, l'ingénieur Degroodt et la société de construction Schokbeton. L'élément déterminant du concept était l'utilisation d'éléments de façade préfabriqués : la façade est constituée de 2 500 cadres hyperstatiques en béton armé, à base de ciment blanc. Grâce au caractère autoportant des éléments de la hauteur d'un étage, le nombre de points d'appui internes put être limité au minimum. Afin d'assurer la transparence de la façade, les éléments constituant celle-ci furent exécutés avec une forme très élancée : la largeur des montants n'était que de 12 cm. Ces éléments furent fabriqués par la firme néerlandaise Schokbeton suivant le procédé breveté consistant à soumettre les éléments de béton préfabriqués à des petits chocs intenses : les éléments de coffrage étaient fixés sur une table spéciale, étaient ensuite soulevés et « relâchés » en une fois de manière périodique. Ceci assurait un compactage rapide et optimal qui rendait les éléments très durables et rigides, sans perte de propriétés structurales. De plus, un traitement de surface complémentaire n'était pas nécessaire, ce qui améliorait davantage l'aspect économique.

Figure 1 : Le Foncolin à Bruxelles[1]

La combinaison de propriétés esthétiques, structurales et techniques dans le bâtiment Foncolin a calmé les préjugés négatifs à l'égard des qualités esthétiques d'un bâtiment construit avec des éléments préfabriqués. La presse spécialisée fit l'éloge de la

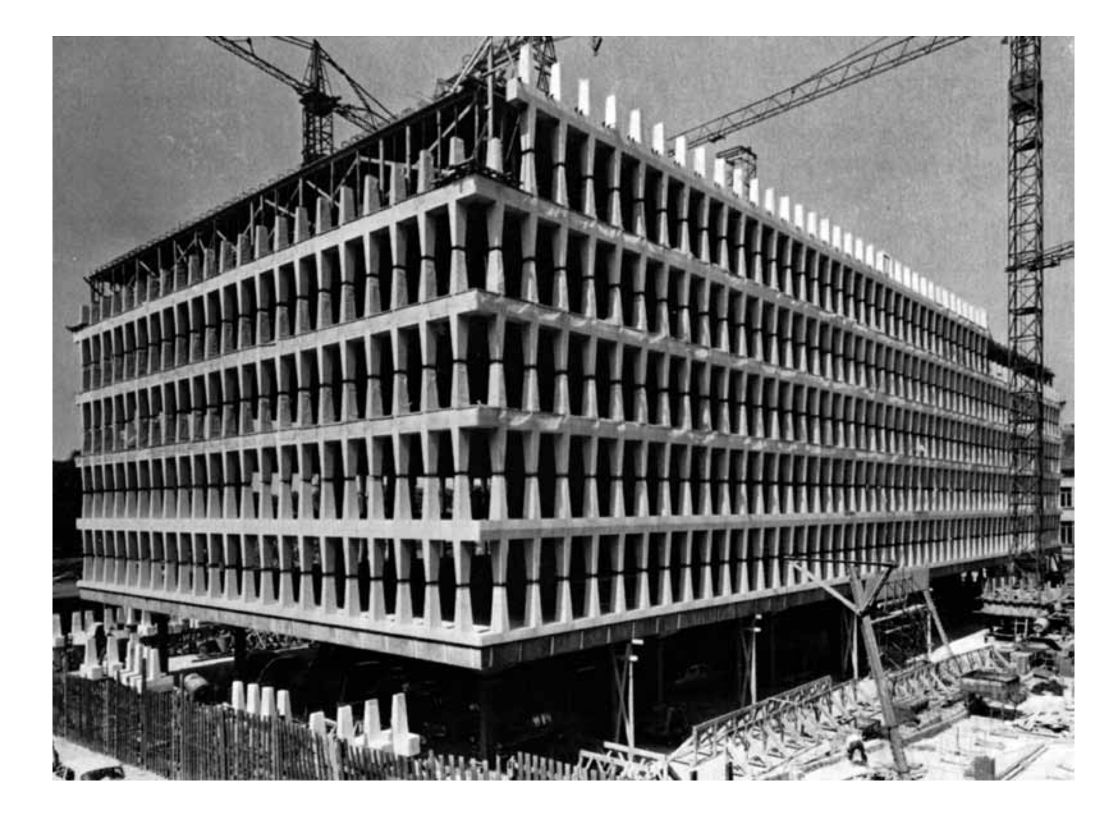


Figure 2 : La BBL à Bruxelles pendant la construction[2]

conception architecturale et du plan ouvert du bâtiment, rendu possible grâce à l'utilisation de « schokbeton » ; l'immeuble parut, par exemple, en couverture du magazine « Architecture » qui donnait le ton. Le bâtiment Foncolin aurait été, paraît-il, une source d'inspiration pour le bâtiment de la BBL (actuellement ING) à Bruxelles (1959-65) (Fig. 2). À l'origine, l'architecte américain Gordon Bunshaft du bureau Skidmore, Owings & Merrill avait prévu un bâtiment en acier qui correspondait aux idées américaines contemporaines sur l'architecture de bureaux. Le prix relativement élevé de l'acier en Europe de l'Ouest et l'implantation le long de la petite ceinture en face du Palais royal, ont finalement orienté le choix vers un bâtiment monumental en béton. Pour obtenir un concept efficace et flexible, avec le plus petit nombre possible de points d'appui intermédiaires, le bâtiment fut élevé avec des éléments de façade préfabriqués en « schokbeton », qui avaient une fonction tant porteuse qu'architecturale. Les éléments sont cruciformes, ont une hauteur de 3 m et une largeur de 1,4 m, et sont fabriqués avec des granulats blancs et du ciment blanc. Les bras horizontaux furent reliés au niveau des planchers situés derrière la façade par du béton coulé sur place ; les éléments furent reliés verticalement à l'aide de rotules en acier inoxydable.

L'appréciation internationale du bâtiment Foncolin et du bâtiment de la BBL a incité le producteur belge de ciment CBR à se concentrer sur le béton architectonique. Avec Ergon, une filiale de CBR, un département spécial pour le béton architectonique fut créé au début des années 60. Des recherches ont été entreprises, entre autres, sur la composition idéale du béton, du temps de prise, des matériaux de coffrage et des traitements de surface. Les années suivantes, les résultats de ces recherches ont été mis en pratique à l'aide de l'architecte Constantin Brodzki, entre autres, dans les immeubles de bureaux d'Ergon (1964-66, Lierre) et CBR (1967-70, Watermael-Boitsfort, en collaboration avec l'architecte Marcel Lambrichs) (Fig. 3). Un nouveau concept fut établi pour les éléments de façade de chaque nouvel immeuble, mais en utilisant chaque fois le même schéma structural. À l'intérieur, il n'y avait pas de points d'appui intermédiaires : l'espace fut franchi en une fois (d'une façade à l'autre ou d'une façade au noyau central) avec des hourdis en béton précontraint. Les éléments de façade en béton architectonique ont été livrés sur chantier entièrement préfabriqués par Ergon, y compris le vitrage. Grâce à une rationalisation poussée, les immeubles ont été réalisés à un rythme accéléré: le bâtiment CBR fut érigé en quatre mois à peine, à une cadence de huit à neuf jours de travail par étage. Tout comme le bâtiment de la BBL, le bâtiment CBR fut fort apprécié : représentatifs d'un développement spécifique de l'architecture à cette

Figure 3 :
Le bâtiment CBR à
Watermael-Boitsfort[3]



époque, les deux bâtiments furent ultérieurement montrés à l'Exposition *Transformations in Modern Architecture* 1960-1980 au MoMa à New-York.

Durant les années 60 et 70, le béton architectonique fut utilisé fréquemment par CBR/Ergon et d'autres nouvelles sociétés qui s'étaient spécialisées dans ce domaine. Outre les avantages techniques et économiques, les possibilités architecturales ont également contribué à ce succès. Le béton architectonique est utilisé principalement dans des immeubles de bureaux et d'entreprises, tels que l'usine Torrington à Nivelles (arch. Marcel Breuer, 1963-64), la Générale de Banque à Hasselt (arch. Jaspers, 1968-70), le Crédit communal à Bruxelles (arch. Lambrichs, 1968), le bâtiment de la CGER à Bruxelles (arch. Lambrichs, 1970-74) (Fig. 4), la Générale de Banque à Mons (arch. Dupuis et Guchez, 1971), le supermarché Rob à Woluwé-Saint-Pierre (arch. Nottebart, 1973), SWIFT I à La Hulpe (arch. Brodzki, 1980-83)... Lors du passage du modernisme au postmodernisme, le style d'architecture typique du béton architectonique a également évolué. La meilleure illustration en est l'immeuble de bureaux SWIFT II à La Hulpe (arch. Brodzki et Ricardo Bofill, 1984-88).

Figure 4 : La CGER
à Bruxelles[4]



# QUATRE EXEMPLES D'HABITATIONS EN BÉTON APPARENT. 2004-2013

**Guy Mouton**

Les structures de ces maisons, œuvres de différents architectes, ont toutes été conçues et étudiées par *Studieburo Mouton* de Gent.

## HABITATION À GISTEL « ENTRE QUATRE MURS ». 2004

Ce premier exemple est l'œuvre de l'architecte Annekatrien Verdickt (actuellement *TETRA architecten bvba*) de Bruxelles en collaboration avec l'ingénieur-architecte Marc Belderbos. Les travaux ont été réalisés par l'entreprise Furnibo de Veurne.

Cette habitation de béton et de verre est composée de quatre murs porteurs parallèles en béton apparent, deux murs extérieurs et deux murs intérieurs (Fig. 1). Ces murs expriment la massivité. Une exécution de qualité exceptionnelle était indispensable pour que ces murs expriment cet aspect architectural.

Les études pour la réalisation des baies de porte et des réservations notamment pour l'électricité ont abouti à l'utilisation de béton auto-compactant. La fluidité de ce béton augmenta sensiblement les chances de réussite du projet. La nécessité de reconcevoir le projet en béton auto-compactant mena les architectes à l'étude des qualités architecturales de ce matériau. Son aspect lisse et tactile, différent de celui d'une exécution classique en béton armé, a séduit les architectes et le maître d'ouvrage qui ont rapidement reconnu sa valeur architecturale.

L'isolation thermique des murs extérieurs est obtenue par 6 cm en verre cellulaire pris en sandwich entre deux voiles de béton de 17 cm d'épaisseur conduisant ainsi à une épaisseur totale de 40 cm. Les deux murs intérieurs sont massifs et également d'une épaisseur de 40 cm justifiée uniquement par des raisons architecturales (Fig. 2).

Dans la phase préparatoire à l'exécution, il y a eu une concertation avec différents intervenants potentiels, afin de définir les





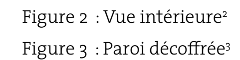


Figure 2 : Vue intérieure[2]

Figure 3 : Paroi décoffrée[3]



Figure 1 : Maison « Entre quatre murs »[1]

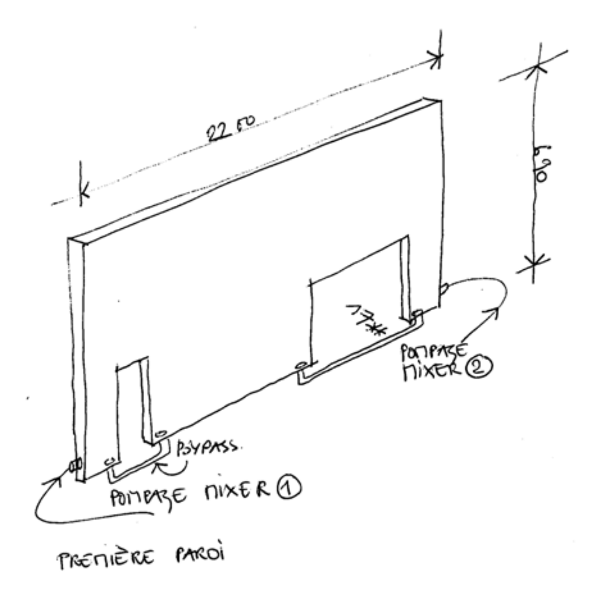



Figure 4a : Pompage du béton pour la première paroi[3]



Figure 4b : Mur en cours de bétonnage[3]

choix concernant la composition de béton, les coffrages et les huiles de décoffrage. Des mock-ups ont aidé à évaluer le résultat souhaité. Les plans ont dû être redessinés sur base des dimensions des panneaux du système de coffrage choisi : Cométal système Bimet, dimension des panneaux : 2,4 m x 3,3 m.
Pour les deux murs extérieurs, on coula d'abord la paroi intérieure, ensuite l'isolation fut placée et ce n'est qu'après que la paroi extérieure proprement dite fut réalisée. Les extrémités de la paroi d'une longueur de 23,10 m, sont posées sur des glissières (néoprène sur rail) afin de permettre les mouvements liés au retrait (Fig. 4b - avant-plan). La présence des baies a conduit à bétonner les murs de 23,10 m x 8,4 m en « injectant » le béton par le bas aux deux extrémités (Fig. 4a). C'est cette technique qui a été mise en œuvre pour le premier mur ; le bétonnage a été réalisé avec deux camion mixers et deux pompes. Ensuite, au vu de cette première expérience très positive, on se limita, pour les phases suivantes, à un seul camion mixer et une seule pompe injectant le béton au bas du mur à une des extrémités seulement.

Vu l'absence de murs orthogonaux aux murs principaux, la stabilité transversale est essentiellement assurée par l'encastrement d'un des murs intérieurs dans le mur de cave sous-jacent.

Un cinquième mur, non porteur, formant avec son important porte-à-faux une division architecturale de l'espace de vie, est ancré à la dalle de toiture au moyen d'une barre de précontrainte horizontale.

## EXTENSION D'UNE HABITATION EN BRABANT-FLAMAND. 2013

Ce deuxième exemple est l'œuvre des architectes *Coussée & Goris architecten* de Gent. Les travaux sont en cours de réalisation par l'entreprise Fiebra Maes de Wetteren.

Le maître d'ouvrage de ce projet de rénovation, comportant une nouvelle extension, souhaite disposer d'une grande surface murale. Pour cela, il fut décidé d'exécuter uniquement l'enveloppe extérieure de la nouvelle partie à construire en béton apparent. L'extension est reliée à la cave de la ferme démolie et à l'ancienne grange qui sera restaurée (Fig. 5 et 6).

En raison de sa continuité, la massivité des murs extérieurs en béton donne à ce projet une dimension supplémentaire. Les parois extérieures de la construction neuve, maison à patio, sont réalisées d'un seul tenant et donnent ainsi un développement extérieur prononcé. Les parois comportent d'importantes ouvertures pour les baies vitrées. Tous les murs commencent à un même niveau et sont bétonnés en hauteur en une seule phase. Par contre, le développement de la façade en plan est réalisé en plusieurs phases. Chaque partie de mur est ancrée à la fondation en son



Figure 5 : Visualisation[4]

milieu. Le reste de la surface de contact entre mur et fondation est rendue glissante par l'interposition de plaques de téflon. L'extrémité des murs est amincie et fortement armée pour pouvoir transmettre, par formation de rotules plastiques, d'un pan de mur à l'autre, les tensions induites par les variations dimensionnelles liées aux variations thermiques. Dans le cas de cette maison, il ne fut pas nécessaire de redessiner les plans sur base du système de coffrage choisi. Les marques liées au coffrage sont atténuées par un sablage ultérieur léger de la surface de béton. De plus, ce traitement a un effet positif sur la massivité. Il renforce le caractère massif du béton. Cette technique a également été appliquée au crématorium *Hofheide* (Holsbeek) des mêmes auteurs de projet.

La stabilité latérale de la maison à patio est obtenue en reliant les parties supérieures des parois extérieures à la dalle de toiture. Celle-ci forme une « plaque » horizontale rigide qui est bloquée par les murs intérieurs en maçonnerie portante. Comme l'ossature en béton est continue sous les baies des fenêtres, elle forme un ensemble rigide résistant aux mouvements horizontaux liés au retrait et aux dilatations thermiques. L'armature de retrait a été déterminée en fonction d'une ouverture de fissure maximale de 0,2 mm. Un béton auto-compactant sera probablement également utilisé ici aussi en raison des détails de châssis complexes. Aucun joint de dilatation n'est prévu. Tous les joints de reprise sont armés, afin de ne pas se fissurer sous l'action du retrait.

## UNE MAISON DANS LES DUNES À LA CÔTE BELGE. 2010

Ce troisième exemple est l'œuvre des architectes *Coussée & Goris architecten* de Gent. Les travaux ont été réalisés par l'entreprise Furnibo de Veurne.

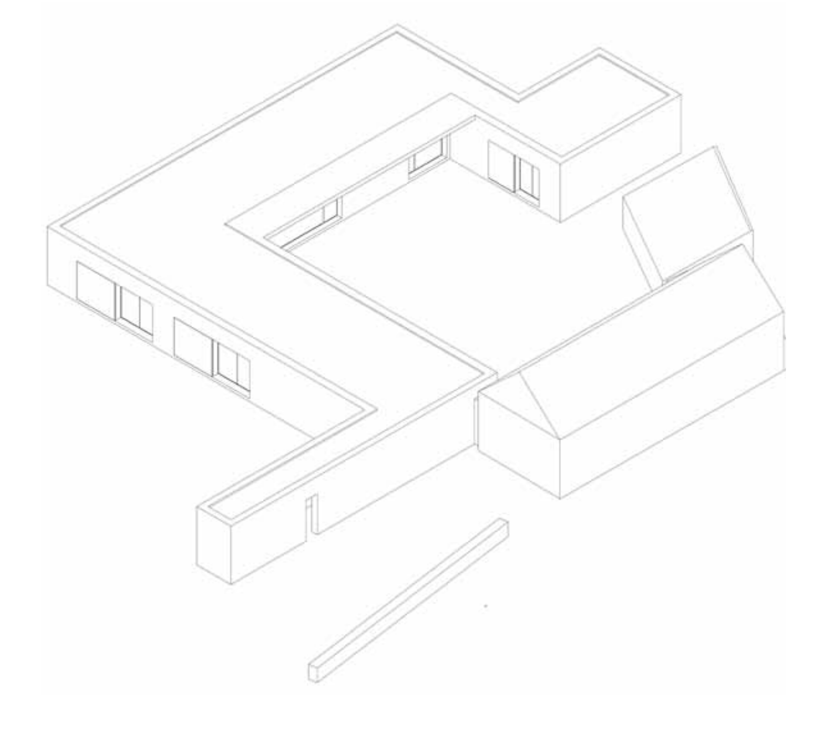


Figure 6 : Axonométrie[4]

Cette habitation familiale est surtout intéressante en raison de la complexité dans l'élaboration des façades latérales en béton auto-compactant. Il s'agit de l'extension d'une habitation existante sur une haute dune. Les volumes situés plus bas, comptant deux niveaux, comprennent le garage, la piscine, la cuisine et la chambre des parents. Les volumes construits épousent la limite du terrain, les angles ne sont donc pas toujours droits. Les volumes supérieurs sont donc parfois en porte-à-faux ou en recul (Fig. 7).

Les doubles murs (15 cm de mur intérieur, 8 cm d'isolation et 17 cm de mur extérieur) ont été construits en une phase. La hauteur de levée de bétonnage a été limitée à un étage en raison de la pression élevée du béton sur l'isolation, qui aurait pu se déplacer et du fait que les deux étages ne se superposent pas toujours parfaitement. Le cahier des charges





Figure 7 : Maison dans les dunes[5]

prévoyait la réalisation de cages d'armatures englobant les murs extérieurs et intérieurs. Des armatures transperçaient l'isolant entre les murs, ainsi celui-ci était solidement maintenu en place. Des barres d'armatures supplémentaires étaient ajoutées des deux côtés selon les nécessités. De plus, la rigidité de ces cages d'armatures évitait que les écarteurs ne soient écrasés contre le coffrage. Lors de la réalisation, une forme simplifiée de cette cage a été mise en œuvre.

Pour les murs, réalisés en béton auto-compactant, on a utilisé un coffrage Cométal système Bimet de dimension de panneaux : 2,4 m x 1,5 m, ce type de coffrage permettant des joints très serrés, bien alignés dans le plan des murs évitant ainsi des surépaisseurs. Pour obtenir une cohérence optimale entre le coffrage et l'architecture, une résille correspondant aux limites des panneaux de coffrage a été reprise sur les plans des murs à coffrer. Les pans de mur ont été coulés un à un. Aux angles, les panneaux de coffrage ont été placés dans la prolongation du mur à bétonner. Les cages d'armatures et l'isolation formaient l'angle du mur. Au-delà de l'angle, le coffrage du mur suivant se connectait au précédent (Fig. 8).

Pour garantir la continuité dans les angles et éviter les fissurations de retrait, un pourcentage d'armature supérieur a été placé dans le joint de reprise. Toutefois, le joint de reprise fut enduit d'huile de décoffrage afin de permettre un petit retrait et que celui-ci se marque par une fine fissuration verticale nette. Dans l'angle de raccord proprement dit, aucun crochet de liaison entre les murs extérieur et intérieur n'a été placé afin de permettre de légers mouvements différentiels, de plus, les extrémités des murs ont été placées de manière flottante (sur néoprène) pour faciliter leur retrait et leur dilatation.

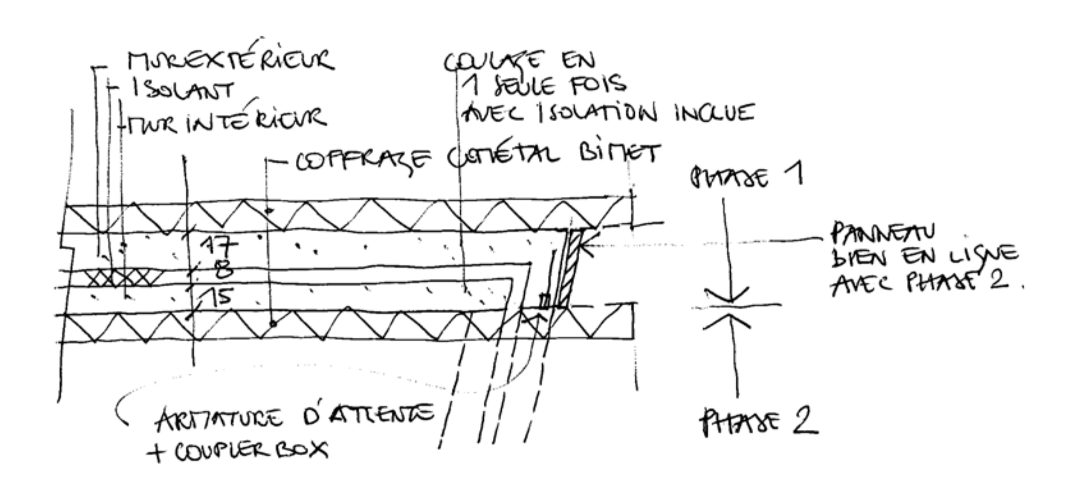



Figure 8 : Détail d'angle[3]

## HABITATION EN ANNEAU À MERELBEKE. 2011

Ce dernier exemple est l'œuvre du bureau d'architectes *De Vylder Vinck Tallieu architecten* de Gent. Les travaux ont été sont réalisés par l'entreprise Verfaillie de Beernem.

Au milieu d'un terrain boisé surgit une maison familiale au plan exceptionnel. Le maître d'ouvrage souhaitait enlever le moins d'arbres possible. Ceci a conduit à un concept en forme d'anneau. Le contour polygonal intérieur de cet anneau comprend six côtés et le contour polygonal extérieur en compte onze (Fig. 9 et 10). Cette maison qui cerne 3 grands arbres était initialement imaginée totalement en bois.

Les façades extérieure et intérieure sont restées en bois, mais la totalité de la structure interne - y compris les dalles de sol et de toiture - ont finalement été conçues en béton. Dix parois en béton apparent positionnées de manière radiale (Fig. 10 et 11) et une colonne circulaire en tube en acier dans laquelle est intégré le conduit de fumée du poêle divisent l'espace et supportent la dalle de toiture.
En raison de sa plus grande portée en façade extérieure, la dalle de toiture présente une rive de 25 cm d'épaisseur. Elle s'amincit jusqu'à 19 cm et au minimum à 15 cm en façade intérieure. La faible pente de toiture qui en résulte assure l'écoulement des eaux de pluie vers le patio. La partie inférieure de la dalle de toiture ainsi que certaines parois en béton ont été coffrées au moyen de voliges. Les autres parois en béton ont été coffrées avec des panneaux de coffrage lisses.

En raison du maintien des arbres, la dalle de sol est « flottante » au-dessus du sol. Il y a seulement deux fondations (profondes) par paroi radiale. Ces fondations profondes sont des pieux tubés placés dans des fouilles préalablement creusées de manière à éviter au maximum les grandes racines des arbres. Des poutres préfabriquées en forme de T inversé ramènent vers ces deux pieux les charges de la dalle de sol et celles de la toiture supportée par les parois radiales. Pour protéger durablement le manteau en acier des pieux tubés, chaque pieu est couvert d'un massif en béton armé. Afin de limiter les ponts thermiques, la poutre préfabriquée n'est en contact avec la superstructure béton qu'en trois points : au droit des pieux et au milieu des parois radiales.
L'intérêt de cette maison réside principalement dans le fait que la construction en béton est un « porteur intégral » de l'architecture, elle est ainsi un « objet d'architecture » à part entière.



Figure 11 : La structure en cours avant les parachèvements[6]



Figure 9 : La maison terminée[6]



Figure 10 : Les trois grands arbres au milieu de l'anneau, vue en cours chantier[6]

## LA MAISON DELSEMME, SUR LES HAUTEURS DE TILFF. 2002

**Bruno Albert et Vincent Servais**

Ce cinquième exemple est l'œuvre de l'architecte Bruno Albert de Liège, les études de structure ont été menées par le bureau d'étude Greisch de Liège et les travaux réalisés par l'entreprise BESSEGA de Fléron. Contrairement aux maisons précédentes implantées en terrain plat ou quasi plat, cette dernière se situe sur un flanc de colline. Elle est fondée sur terrain rocheux tandis que les autres étaient fondées sur terrain meuble.

Cette maison d'habitation et bureaux pour profession libérale est construite sur les hauteurs de Tilff près d'Esneux, dans la périphérie Liégeoise. La forte pente, l'orientation ainsi que le caractère arboré du terrain ont conduit à une conception volumétrique franche (Fig. 1). La maison dialogue avec le jardin, conçu et aménagé par le maître d'ouvrage, architecte paysagiste de métier (Fig. 2). L'expression des façades assez fermées, est le résultat de vues cadrées sur le jardin, sur la vallée en contrebas et joue à renforcer l'expression d'une masse abstraite flottante, se projetant vers la vallée (Fig. 1 et 5). L'utilisation de matériaux bruts ainsi que le soin apporté aux détails constructifs cherchent à accentuer cette impression d'abstraction : revêtement de façade en béton apparent, menuiseries en bois cérusé, garde-corps en acier inoxydable.
La forte déclivité et les contraintes du programme ont fortement influencé l'organisation du plan : le garage est au rez-de-chaussée, le bureau professionnel et sa bibliothèque sont au premier et deuxième étages, le séjour et la cuisine au troisième, les chambres et salle de bains au quatrième.
Un dialogue et une collaboration étroite avec le maître de l'ouvrage ont donné l'opportunité de pousser la démarche jusque dans le dessin du mobilier et a permis l'intervention des artistes : Laurence Fresson pour la fontaine et Léon Wuidar pour les sérigraphies sur portes vitrées[2].

Figure 1 : Une masse flottante se projetant vers la vallée[1]





Figure 2 : Vue latérale - Le jardin[1]

Le projet de la maison Delsemme est issu d'une réflexion basée sur un matériau, ses caractéristiques, sa mise en œuvre et son esthétique. Le béton en est donc l'essence même.
La typologie particulière du terrain, sa forte déclivité, l'engravement du volume dans ce relief fondent la construction directement sur le rocher schisteux.

La maîtrise des coffrages, leur calepinage, les joints de reprise, la gestion des brêlages (Fig. 4) et des coffrages grimpants (Fig. 3) ont induit et dirigé la géométrie finale du projet. Cette étroite équation a permis de concentrer cette construction pure sur l'essentiel.

Structuralement, les deux voiles principaux portent la construction. Le porte-à-faux, créé pour déployer des planchers satisfaisant au programme, permet une position idéale du volume dans son site (Fig. 5). Ces voiles porteurs constituent également le parement final de cette construction.
L'ensemble des planchers intérieurs a été posé avec une logique de coupure thermique permettant une construction de type « boîte dans la boîte » (Fig. 4) et répondant aux impositions thermiques actuelles.





Figure 3 : Coffrage grimpant[3]

Figure 4 : Brêlages de coffrage - La « boîte dans la boîte »[3]

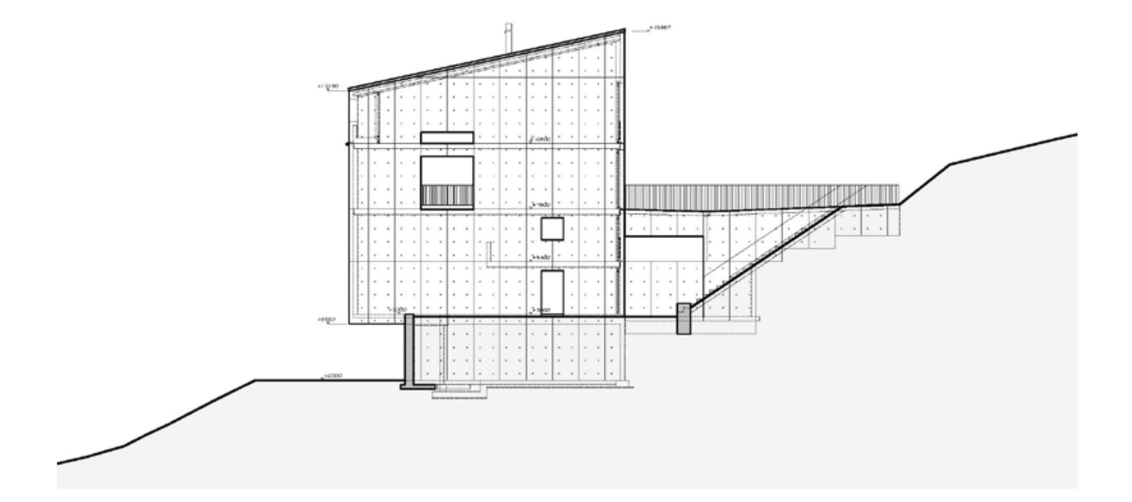


Figure 5 : Coupe transversale[4]

## CRÉMATORIUM *HOFHEIDE* À HOLSBEEK (AARSCHOT). 2013

**Klaas Goris et Guy Mouton**

Le crématorium *Hofheide*, œuvre des architectes *RCR Aranda Pigem Vilalta Arquitectes* (Olot, Espagne) & *Coussée & Goris architecten* (Gent) assistés par *Studieburo Mouton* (Gent) pour le concept et les études structurales, est pensé comme s'il avait émergé du marais environnant. La zone d'infiltration naturelle s'étend en un terrain marécageux avec en son sein un volume robuste, « sarcophage monumental » ne faisant qu'un avec le paysage (Fig. 1). L'eau qui l'entoure crée une distance, de l'espace et forme un tampon par rapport à la vie courante. Le temps s'arrête, les bruits de fond de la vie quotidienne disparaissent, il ne reste autour du crématorium qu'un no man's land apaisant.

Un choix logique de matériaux soutient au mieux cette implantation naturelle à orientation paysagère. En harmonie avec la roche ferrugineuse locale, le volume est entièrement érigé en béton pigmenté avec des sables et graviers naturels. Le crématorium n'est pas « planté » dans le paysage comme un étrange intrus en béton. Le sous-sol semble plutôt s'être soulevé spontanément, offrant tel un coquillage, une protection à ses visiteurs.

Le béton apparent brut est coulé d'un seul tenant sur toute la hauteur. Les différentes strates sont visibles de manière fragmentée et font référence aux strates cohérentes du temps qui s'empilent indéfiniment jusqu'à former une masse liée. Les vies individuelles en sont transcendées et encapsulées. En outre, le béton stratifié évoque les strates géologiques hors desquelles le crématorium semble s'être soulevé tel un produit naturel du paysage environnant. Le coloris intense du crématorium qui prolonge le grès couleur ocre du sous-sol rend l'édifice tant monumental qu'intime et sécurisant par son caractère tactile.
Les découpes dans le béton offrent une lumière zénithale et rasante aux espaces sacrés et sont en outre un hommage non-dissimulé à l'architecte Juliaan Lampens. Même si le béton semble robuste et durable dans le temps, chaque architecture reste en essence éphémère et redeviendra un jour poussière.

Figure 1 :
Vue d'artiste du projet avant exécution[1]



C'est l'utilisation du paysage environnant qui est le porteur fondamental de l'entièreté de ce projet et qui permet au concept de se réaliser architecturalement au-delà du matériel. Le crématorium se fond finalement dans les plis interminables du temps.

Le sol contient beaucoup de glauconie, ce qui se traduit en grands blocs de grès ferrugineux utilisés pour la construction de nombreux monuments dans les environs (comme l'église d'Aarschot et la basilique de Scherpenheuvel). L'objectif de faire apparaître les parois du crématorium telles des coupes géologiques taillées dans le paysage, conduit à des blocs de béton massif, continus dans les angles, d'une teinte qui rappelle plutôt le sous-sol que le béton.

La variation de couleur, la continuité de l'exécution et la tactilité qui soutient l'ambiance sacrée du crématorium sont des propriétés qui contribuent à l'obtention du résultat escompté. Mais ceci exige une étude préalable fouillée pour ce qui est de la massivité, de la continuité, de la couleur et de la texture.

Dans la phase d'étude, bien avant l'adjudication, des réflexions ont été menées pour obtenir un béton ayant l'aspect du grès. Des recherches avancées, notamment pour ce qui est des teintes, ont été réalisées en collaboration avec FEBELCEM, le Centre de recherche de l'industrie cimentière (CRIC), la Fédération belge du béton prêt à l'emploi (FEDBETON) et des sociétés spécialisées telles qu'Eurominerals (granulats), Grace (pigments) et Vanhout (coffrages). L'objectif étant d'obtenir un béton n'ayant pas l'aspect d'un béton teint dans la masse par l'adjonction de pigments, mais d'un béton ayant naturellement, notamment par ses granulats, la teinte souhaitée. Des échantillons de petite taille ont d'abord été réalisés (CRIC) avec un « rendu honnête » de la teinte du grès du sol en place (Fig. 2). On est passé ensuite à de petites parois de 2 m sur 1 m. Celles-ci ont été réalisées avec la collaboration de la centrale à béton d'Holcim d'Aarschot et de *Sint-Lucas Architectuur Brussel*. Ces parois d'essai ont été réalisées à partir de neuf mélanges différents et avec cinq coffrages différents. Elles comportaient des difficultés telles que des empreintes d'écarteurs et des réservations. Sur base de ces essais, un choix provisoire de composition de béton et de coffrage a été posé. Finalement, un essai à plus grande échelle a été réalisé sur un mock-up d'élément d'angle.

Les observations résultant de ces essais ont été reprises dans le cahier des charges. Il a également été demandé à l'entreprise d'affiner l'un ou l'autre élément et d'effectuer

Figure 2 : Échantillons de béton de petite taille[2]







Figure 3a : Vue intérieure en cours de chantier[1]

Figure 3b : Vue extérieure en cours de chantier[2]

un mock-up d'une paroi à échelle réelle. L'entreprise Strabag a été chargée des travaux. En cours de chantier, la couleur de la composition de béton a été ajustée : on est passé d'une teinte rouge prononcée à une teinte plus jaune. Cette dernière correspondant mieux aux teintes des couches superficielles du sous-sol et offrant un meilleur contraste avec la couleur brun rouge de l'auvent en acier autopatinable. Le coffrage aussi fut ajusté de commun accord pour passer d'une surface plus ou moins rugueuse (coffrage en panneaux de bois) à une surface de béton légèrement sablée.

Les parois extérieures sont doubles et coulées en deux phases. Pour permettre le bétonnage de la hauteur de 8,10 m d'un seul tenant, l'entrepreneur a mis au point un système de tubes qui guident le béton dans le coffrage pour éviter qu'il ne tombe simplement dans celui-ci. Les joints de reprise verticaux sont traités avec un produit antiadhésif et ne sont pas armés. La cave est réalisée en béton gris ordinaire. Les parois en béton teinté commencent partout au même niveau. Les sols qui sont à des niveaux différents, sont coulés entre ces parois dans une seconde phase.

Le béton n'est pas auto-compactant, mais d'une classe de fluidité S4. Le bâtiment proprement dit, sans la toiture, mesure 140 m sur 25 m (Fig. 4) et est découpé par trois joints de dilatation.

Les angles, sollicités par les dilatations thermiques, ont fait l'objet d'une attention particulière. Dans la paroi extérieure de 14 cm d'épaisseur, il n'y a qu'un treillis avec un enrobage de 35 mm. Dans la paroi intérieure de 21 cm d'épaisseur, l'enrobage est de 30 mm. L'emplacement des joints de reprise a été proposé par l'entrepreneur, discuté avec les auteurs de projet puis fixé de commun accord. Du fait que toutes les parois visibles sont exécutées en béton teinté, le plan présente une grande complexité. Avec une longueur totale de 140 m, le crématorium *Hofheide* est un bel exemple d'utilisation de béton apparent à grande échelle.

Tous les ouvrages en béton ont déjà été réalisés. Il reste à mettre en œuvre l'écran vertical qui entourera le « sarcophage » sur son pourtour de 300 m de longueur. Cet écran est composé de lamelles en acier autopatinable de 5 mm d'épaisseur, de largeur variable et de 5,5 m de hauteur (Fig. 1). Elles sont suspendues à un auvent en béton et rigidifiées par torsion afin de pouvoir résister aux actions du vent.

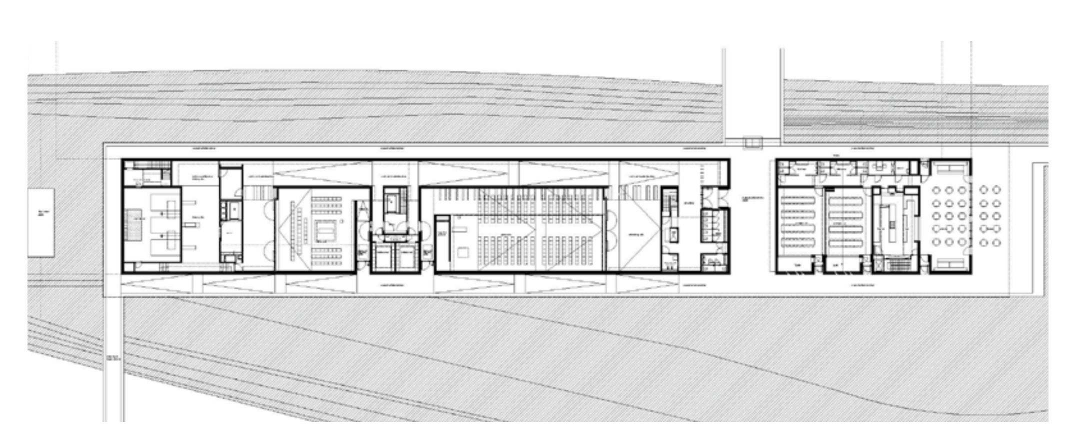


Figure 4 : Vue en plan[2]

## RÉFÉRENCES

**P. Lhoas - Le béton en architecture, le béton comme expression architecturale**

[1] Le Corbusier, *Vers une architecture*, ré-édition, Paris, Fréal, 1958 – original 1923, Crès, Paris.
[2] Kahn L (auteur) et Griswold Tyng A (éditeur), *Louis Kahn To Anne Tyng: The Rome Letters 1953-1954*, New-York, Rizzoli, 1997, p54
[3] Crédit photographique : waterandpower.org/museum/Aviation_in_Early_LA_(Page_3).html
[4] Banham R. (1976). *Megastructure: Urban futures of the recent past*. Londres : Thames and Hudson Ltd.
[5] Coll. *Kisho Kurokawa, from Metabolism to Symbiosis*, Londres/New-York, Academy Edition/St Martin's Press, 1992
[6] Crédit photographique : afasiaarq.blogspot.com/2012/01/toyo-ito
[7] Crédit photographique : R. Kohler www.richardkohler.com
[8] Bekaert G. (1991). *L'architecture contemporaine en Belgique*. Bruxelles : Racine.
[9] Bekaert G. & Strauven Fr. (1971). *La construction en Belgique 1945-1970*. Bruxelles : confédération nationale de la construction.
[10] Bontridder A. 1963. *L'Architecture contemporaine en Belgique : Le dialogue de la lumière et du silence*. Anvers : Helios.
[11] Burniat P., Puttemans P., Vandenbreeden J. (2000). *L'architecture moderne à Bruxelles* – Guide. Bruxelles : les éditions de l'Octogone.
[12] Cohen J-L (2012). *The Future of architecture*. Londres : Phaidon.
[13] Coll. (1998). *Charles Vandenhove : art et architecture*. Tournai : La Renaissance du Livre.
[14] Devos R. et De Kooning M. (Dir.) (2006). *L'architecture moderne à l'Expo 58 : pour un monde plus humain*, Bruxelles : Fonds Mercator et Dexia Banque.
[15] Lanotte A. (Dir.) (2001). *Roger Bastin architecte 1913-1986*. Sprimont : Mardaga.
[16] Curtis W. J.P. (2006). *L'architecture moderne depuis 1900, Londres* : Phaidon.
[17] Gropius W. (1913). Die Entwicklung moderner Industriebakunst, In *Die Kunst in Industrie und Handel*, Jahrbuch des deutschen Werkbundes, Jena : Eugen Diederichs.
[18] Puttemans P. (1974). *Architecture moderne en Belgique*, Bruxelles : Vokaer.
[19] Dubois M. (1993). *Belgio : Architettura, gli ultimi vent'anni*. Milan : Electa.

**S. Van de Voorde - Le développement du béton architectonique en Belgique. Du Foncolin au CBR**

[1] *Architecture*, 1959, 27, 161
[2] *La Technique des Travaux*, 1962, 38(9-10), 286
[3] Collection A. Van Acker
[4] *La Technique des Travaux*, 1974, 50(346), 76
[5] (1959). Le Foncolin, Immeuble pour bureaux à Bruxelles. *La Technique des Travaux*, 35(3-4), 103-110.
[6] (1964). La Banque Lambert à Bruxelles. *Architecture*, 61, 728-741.
[7] (1965). Belgique. Usine Torrington à Nivelles. *Techniques & architecture*, 25(5), 70-75. Archives Ergon.
[8] Berghman, J. & Gryp, A. (2007). *Betoninnovaties in de Belgische architectuur: Schokbeton*. Université de Gand.
[9] Hoste, G. (2004). *Constantin Brodzki, architecte*. Sprimont: Mardaga.
[10] Kidder Smith, G.E. (1961). *The New Architecture in Europe*. Cleveland (Ohio): World Publishing co.
[11] Novgorodsky, L. (1971). Nouveau siège social des Cimenteries C.B.R. à Watermael-Boitsfort. *La Technique des Travaux*, 47(9-10), 267-273.
[12] Van de Voorde, S. (2008). Beton in de Belgische architectuur (1945-1970) (3). Van Foncolin (1955-58) tot CBR (1967-70). *Cement*, 60(7), 11-16.
[13] Van de Voorde, S. (2011), *Bouwen in Beton in België (1890-1975). Samenspel van kennis, experiment en innovatie*. Université de Gand (thèse de doctorat), 2 v.
[14] Van de Voorde, S. (2011). *Architectonic 1958-1980. Façades en béton*. Bruxelles: Atomium Foundation.

**G. Mouton - Quatre exemples d'habitations en béton apparent. 2004 – 2013**

[1] Crédit photographique : AK Verdickt
[2] Crédit photographique : Kim Zwarts
[3] Crédit photographique : Studieburo Mouton
[4] Crédit photographique : Coussée & Goris architecten
[5] Crédit photographique : Artemise
[6] Crédit photographique : F. Dujardin

**B. Albert et V. Servais - La Maison Delsemme, sur les hauteurs de Tilff. 2002**

[1] Crédit photographique : Serge Brison
[2] Texte écrit en collaboration avec Bruno Albert Architecte & Associés S.C
[3] Crédit photographique : Bureau Greisch
[4] Crédit photographique : Bruno Albert Architecte & Associés S.C

**K. Goris et G. Mouton - Crématorium *Hofheide* à Holsbeek (Aarschot). 2013**

[1] Crédit photographique : Coussée & Goris Architecten
[2] Crédit photographique : Studieburo Mouton

# CONCLUSION

## PATRIMOINE

Sous l'étiquette « béton armé », une appellation généraliste, se cache un matériau aux réalités multiples. Cet ouvrage permet d'en saisir la pluralité et l'évolution. Tant dans sa composition que dans sa mise en œuvre et son utilisation, le béton armé s'est transformé de façon significative depuis la fin du 19ème siècle. Comprendre les différentes phases de cette évolution est indispensable pour préserver et restaurer ces bétons de manière pertinente, c'est-à-dire de façon spécifique et durable. Cerner les caractéristiques de chaque type de béton est la première étape d'une conservation appropriée. Nous résumerons brièvement ici les principaux stades de la mutation du béton armé et précontraint en Belgique. Tout comme pour d'autres matériaux, certaines avancées techniques cruciales ont connu une diffusion internationale. Parallèlement, selon les régions, le béton armé révèle une créativité à multiples facettes dans l'exploration de sa composition, de son utilisation, de son esthétique, etc.

La première génération de béton armé, celle des années 1850-1900, est souvent désignée comme celle des pionniers, où intuition et empirisme régnaient. Les constructeurs étaient en majorité des entrepreneurs, inventeurs de systèmes qu'ils brevetaient, la plupart du temps, nationalement. Les premières applications structurales du béton armé recourent à ces multiples systèmes commerciaux. Un des plus connus en Belgique est celui mis au point par Hennebique vers 1892. Diverses expériences sur des éléments de structure sont effectuées, au début uniquement par les constructeurs eux-mêmes, ensuite, également, par les universités et autres corps scientifiques. La connaissance des propriétés du matériau, s'enrichit. Dès 1900, le béton armé entre dans une phase de scientification, avec l'apparition des premières théories et règles de calcul mises au point un peu partout en Europe. Les structures en béton armé de cette période d'avant-guerre fournissent une large palette de compositions, de mises en œuvre, de types et dispositions d'armatures, etc., propres à chaque système. Les possibilités offertes par le nouveau matériau ne sont alors ni comprises, ni exploitées totalement. Son architecture et son vocabulaire propre restent encore à inventer. La plupart des ponts en béton armé de cette période, par exemple, ressemblent formellement aux ponts en maçonnerie ou à certains types de ponts métalliques. Cependant, certains constructeurs, comme Hennebique, et surtout Maillart, commencent à concevoir des ouvrages d'art tirant parti des propriétés originales du béton armé.

Dans l'entre-deux-guerres, le béton armé devient un matériau de construction standardisé. Il est utilisé, indistinctement, pour les bâtiments administratifs ou de logement, les bâtiments religieux, les bâtiments récréatifs, etc., non sans oppositions et débats animés cependant. Une certaine professionnalisation du secteur se met progressivement en place.

Dans les années 1920, les propriétés différées du béton, que sont le retrait et le fluage, sont désormais perçues clairement par l'ingénieur français Freyssinet, un des précurseurs en cette matière et au rôle tout aussi prépondérant pour le béton précontraint. Cette évolution fondamentale du béton armé sera surtout utilisée après la Seconde Guerre mondiale. L'ingénieur belge Magnel a largement contribué à son implantation en Belgique. Grâce à l'amélioration des performances du béton armé et des techniques disponibles, de nouvelles esthétiques vont voir le jour.

Le béton précontraint a, permis notamment la construction de ponts plus élancés et de plus grande portée. La technologie de précontrainte a aussi beaucoup évolué. Par exemple, les fils gainés ou non gainés (avec souvent une déficience au niveau de l'enrobage) ont cédé la place aux torons.

Les formes audacieuses que sont les voiles minces font leur apparition dans les années 1920 en Allemagne, en France et en Espagne. Ces structures d'une simplicité épurée mais fondée sur une mathématique complexe sont introduites en Belgique tardivement, vers les années 1950, en particulier grâce au travail de l'ingénieur Paduart. Les voiles minces sont caractérisés par des épaisseurs extrêmement faibles, donc sensibles aux agressions extérieures (variations de températures, intempéries, etc.), ce qui constitue une de leurs fragilités, en particulier dans nos contrées.

Quant à la préfabrication, elle existe depuis l'invention du béton armé, mais son usage s'est particulièrement intensifié après la Seconde Guerre mondiale pour répondre à la demande pressante de construction de logements. Ce processus peut, en effet, être avantageux de par sa rapidité et son faible coût. Cette période d'après-guerre voit aussi le retour des systèmes constructifs propres à chaque constructeur. Ils ont été développés dans de nombreux logements à bon marché, qui requéraient des systèmes modulaires et peu coûteux. Dans les années 1960-1970, l'exécution par préfabrication a aussi permis l'avènement du béton architectonique lié à la grande qualité du produit fini. Une nouvelle architecture a donc été rendue possible grâce à l'esthétique offerte par la technique de préfabrication.

## DURABILITÉ

Ces quelques histoires de béton armé et précontraint contribuent à l'identification des spécificités d'un ouvrage bâti en béton armé et permettent d'entrevoir les éventuels problèmes de durabilité liés aux connaissances de l'époque, aux moyens de mise en œuvre, etc. De plus, le béton armé, comme tout matériau, subit un vieillissement qui, déjà pour des structures âgées de plus de 50 ans, est souvent notable. Bien que rien ne soit (si) simple, à cette première étape d'analyse et de spécification, une conservation respectueuse cherche donc à proposer les interventions les plus judicieuses en termes de restauration. Actuellement, les techniques appliquées à la réparation de bétons historiques sont les mêmes que celles mises au point pour le béton armé contemporain. Cependant, outre la compatibilité physico-chimique des procédés employés, une composante supplémentaire intervient lorsqu'il s'agit d'un monument historique: celui de respecter les valeurs, historique, scientifique, culturelle, etc. qu'il véhicule.

Des questions d'authenticité (matériel, forme, fonction, etc.) interviennent également. Le béton d'origine détient souvent une valeur documentaire quant à sa technologie, sa mise en œuvre, son vieillissement... Il est le témoin d'une époque particulière qui, avec sa disparition, constitue un appauvrissement de la grammaire du bâti. La réflexion de conservation devrait donc prendre en considération les valeurs patrimoniales attribuées à l'ouvrage bâti (apparence, espace, matériel, usages, etc.). Déterminer les significations fondamentales d'un ouvrage patrimonial en béton armé et les interventions possibles requiert souvent un ensemble (complexe, voire parfois contradictoire)

d'avis de spécialistes expérimentés relevant de disciplines complémentaires. Cette multidisciplinarité est d'autant plus nécessaire que la restauration du béton armé est un champ d'étude assez neuf. Quelles que soient les analyses, les conditions générales d'une intervention sur un monument historique sont la compatibilité et/ou la réversibilité, ainsi que la durabilité de l'intervention. De façon basique, chaque méthode de réparation devrait considérer la balance des bénéfices et des risques pour l'ouvrage existant quant à son état originel, actuel et futur. Son état de conservation présent devrait donc être évalué avec des grilles multiples pour définir l'état futur désiré.

La pertinence du traitement adopté est le résultat d'une étude multifactorielle propre à chaque bâtiment. La conservation et restauration du béton armé font aujourd'hui l'objet de recherches scientifiques, tant sur le plan des philosophies de conservation que sur les techniques de réparation ou de renforcement du béton armé.

## INNOVATIONS

Ce regard sur l'histoire du matériau béton et des constructions en béton conduit à la constatation que les innovations se situent beaucoup plus dans le domaine de l'utilisation et des applications du béton par les architectes, les entrepreneurs et les ingénieurs, que dans la formulation du matériau béton et la production de son composant de base, le ciment. En effet, il est significatif de constater que la composition du clinker a peu évolué depuis la fin du 19ème siècle, et que de saines règles de composition des bétons avaient déjà été clairement énoncées au début du 20ème siècle. En matière de technologie des bétons, les évolutions technologiques marquantes sont rares. Deux sont à mettre au crédit de l'ingénieur français Eugène Freyssinet: l'introduction de la vibration mécanique des bétons qui augmente considérablement la compacité, et donc la durabilité, des ouvrages en béton, et des techniques de cure du béton qui, dès les début des années 1930, permettaient d'atteindre des niveaux de résistance au jeune âge et à long terme qui ne sont pas loin d'égaler celles des bétons dits à « ultra hautes performances » apparus dans les années 1990. Et cela sans adjuvant !

Il faut cependant bien reconnaître que l'emploi d'adjuvants, c'est-à-dire l'apport de la chimie fine, a considérablement élargi, à partir des années soixante, les possibilités de mise en œuvre, le champ d'applications et les performances des bétons. Leur histoire, qui est à écrire, n'a pas été abordée dans ces quelques pages, mais il est clair que sans l'utilisation d'adjuvants chimiques, il eût été impensable d'envisager des constructions en béton à résistance élevée coulé sur chantier ou, plus récemment, la mise en œuvre par gravité et sans vibration de bétons auto-plaçants, pour ne citer que deux exemples phares, témoins de l'apport de la recherche scientifique multidisciplinaire à la formulation des bétons. Et il est fort probable, qu'à l'avenir, la formulation des « nouveaux bétons » nécessitera de façon quasi systématique le recours à des adjuvants.

Autre élément peu évoqué dans ces histoires de béton : les utilisations d'autres liants que le ciment « Portland » issu directement du clinker. Il faut rappeler qu'au 19ème siècle, Coignet, avec son « béton aggloméré », a préfiguré l'usage d'un ciment composé fort répandu, le ciment au laitier de haut fourneau (dit actuellement CEM III), qui présente d'indéniables avantages pour certaines utilisations. L'histoire du développement des liants alternatifs au ciment « Portland » est malheureusement jalonnée de quelques expériences malheureuses. On peut citer, à titre d'exemple, les tentatives infructueuses de réaliser des constructions précontraintes dans les années 1940 au moyen de ciments alumineux expansifs. Et même, l'utilisation de ciment « Portland » ne met pas à l'abri de certains problèmes de durabilité : c'est dans l'ignorance scientifique de l'incompatibilité entre les alcalis du ciment et la silice de certains granulats qu'il faut rechercher l'origine des désordres causés par la réaction alcali-silice (RAS) qui affectent les constructions en béton dans certains pays (heureusement fort peu en Belgique). Or, la mise en œuvre de nouveaux liants, ou plus largement, la diminution de la quantité de clinker dans les bétons et l'incorporation, en lieu et place, de matières granulaires diverses, pouzzolaniques ou non, est le défi de la formulation des bétons au début de ce nouveau millénaire.

Car, à bon escient éthique, la société exige des constructeurs qu'ils fournissent leur part au développement soutenable. Il se dessine déjà, depuis quelques années, que, parmi les multiples contributions à la réduction de la production des gaz à effet de serre, figure la diminution de l'emploi du clinker dans les constructions en béton. C'est un challenge à de multiples points de vue qui s'adresse aussi bien aux industriels, qu'aux concepteurs - architecte et ingénieurs - qu'aux maîtres d'ouvrages, qu'aux entrepreneurs, et non des moindres, aux autorités publiques. La formulation de « nouveaux bétons », utilisant moins de clinker, figure en bonne place parmi les attentes de la construction soutenable. Mais ceci ne peut se faire sans recherches scientifiques approfondies, car le temps sera bientôt terminé où certains déchets industriels - le laitier de haut fourneau, les cendres volantes thermiques et la fumée de silice - trouvaient une valorisation intéressante, tant du point de vue des performances qu'économique, dans la formulation des bétons. Leur raréfaction progressive oblige à d'autres alternatives. L'utilisation de fillers calcaires en substitution à une partie du clinker, quoique non réactifs, semble promise à un avenir intéressant. Beaucoup plus délicates à appréhender sont certaines demandes, en particulier émanant de pouvoirs publics, d'incorporer dans la formulation des bétons des matières granulaires non pouzzolaniques ou très faiblement réactives, résidus d'activités industrielles ou humaines. L'incorporation dans les bétons de ce genre de matières doit s'accompagner de recherches scientifiques multidisciplinaires centrées sur l'étude des pertes de performances et la traçabilité des ajouts.

Pour terminer, rêvons à ce que pourraient être les bétons du futur. Des inventions qui révolutionneraient la construction en béton dans les formes, les applications et l'architecture seraient des bétons dont la résistance à la traction serait égale à la résistance à la compression, ductiles en traction et en compression, sans retrait… Ne seraient-ce pas là les bétons du 21ème siècle ?

**Armande Hellebois et Bernard Espion**

# GLOSSAIRE

**Armature** :
Désigne tout élément incorporé dans un matériau pour améliorer sa résistance à la traction. Armature pour béton armé : fers, tiges ou barres d'acier incorporées au béton qui lui confèrent sa résistance à la traction. Cage d'armature : réseau d'armatures pour béton armé que l'on place dans une poutre, une colonne, une dalle ou une fondation (pieu, semelle). Étrier : pièce d'armature transversale d'une poutre en béton armé. Elle possède généralement une forme rectangulaire et permet à l'élément de reprendre l'effort tranchant.[1]

**Adjuvant** :
Tout produit incorporé au cours du malaxage du béton (à faible dose) pour modifier les propriétés du mélange à l'état frais ou durci. [2]

**Âme (d'une poutre)** :
Partie verticale d'une poutre comprise entre les semelles ou membrures inférieure et supérieure. L'âme est généralement plus étroite que les semelles ou membrures.

**Ancrage à clavette** :
Voir Chapitre 3 : Le béton précontraint. Principes et évolutions technologiques

**Ancrage à cône** :
Voir Chapitre 3 : Le béton précontraint. Principes et évolutions technologiques

**Armature de chaînage** :
Armatures du chaînage dans le cas d'un chaînage en béton armé. Voir chaînage.

**Béton** :
Matériau composite obtenu par le mélange de graviers, de sable, d'eau et d'un liant (généralement du ciment). Ses caractéristiques varient en fonction de sa composition et des adjuvants qui y sont incorporés. Le béton étant mis en œuvre à l'était fluide, il peut prendre toute sorte de formes.[1]

**Béton armé** :
Matériau composite constitué de béton dans lequel sont introduites des armatures en acier. Ces armatures ont pour rôle principal de résister aux efforts de traction que le béton n'est pas capable de reprendre. Les armatures limitent également la fissuration du béton. [1]

**Béton à haute, très haute et ultra-haute résistance (BHR, BTHR, BUHR)** :
Bétons modernes dont la résistance à la compression est supérieure à celle d'un béton ordinaire et dont les propriétés à l'état frais sont fortement améliorées. [1] On parle aussi parfois de « hautes performances » lorsque d'autres caractéristiques que la haute résistance sont recherchées.

**Béton précontraint** :
Béton d'un élément ou d'un ouvrage soumis, avant sa mise en service, à des efforts permanents qui visent à minimiser les zones de traction. L'effort de compression sur le béton est obtenu par la mise en traction d'armatures soit avant le coulage (on parle alors de précontrainte par pré-tension) soit après durcissement du béton (on parle alors de précontrainte par post-tension).[1]
Voir Chapitre 3 : Le béton précontraint. Principes et évolutions technologiques

**Béton architectonique** :
Béton moulé en pièces préfabriquées sous forme d'éléments de façade modulaires finis. Apportées entières sur chantier, ces pièces ne doivent plus qu'être posées. Bien que généralement constitués en béton armé, certains éléments sont également précontraints.[1]

**Béton bouchardé** :
Béton dont la surface a été martelée de manière à obtenir un aspect rugueux (plus proche de la roche naturelle).[1]

**Béton cellulaire autoclavé** :
Le béton cellulaire est un matériau de construction de faible densité composé principalement de sable, de ciment, de chaux, de poudre ou de pâte d'aluminium et d'eau. Après durcissement les éléments manufacturés (blocs, hourdis…) sont placés en autoclave pendant une dizaine d'heures. Sa structure alvéolaire (« bulles » d'air incluses) lui confère de bonnes caractéristiques d'isolation thermique.

**Béton auto-plaçant ou auto-compactant** :
En anglais *Self Compacting Concrete* (SCC), sont des bétons dont la composition particulière permet une mise en place sans vibration, sous le seul effet de la gravité, et ce, même dans un coffrage fortement ferraillé ou à géométrie complexe.[2]

**Béton choqué** :
Voir Serrage

**Béton gunité** :
Voir Gunitage

**Béton maigre** :
Béton faiblement dosé en ciment.

**Brêlage (trous de brêlage)** :
Trous dans les panneaux de coffrage des voiles en béton armé pour le passage de barres provisoires destinées à équilibrer les poussées exercées par le béton frais sur les deux faces du coffrage. Les traces des trous de brêlage sont visibles sur les faces des voiles après décoffrage.

**Câble** :
Voir Chapitre 3 : Le béton précontraint. Principes et évolutions technologiques

**Chaînage** :
Élément de construction qui ceinture chaque niveau au droit du plancher pour empêcher l'écartement des murs.

**Carbonatation (du béton)** :
Réaction qui ne se déroule qu'en milieu **aqueux.** D'abord, il faut que le dioxyde de carbone de l'air se dissolve dans l'eau des pores, ce qui entraîne une chute du pH (d'environ 13 à 9). Par cette chute du pH, l'hydroxyde de calcium (la portlandite) entre également en solution. Les deux produits réagissent et se précipitent sous la forme de carbonate de calcium (calcite). La carbonatation est un phénomène de diffusion, caractérisé par un front de carbonatation à pH 9 progressant de la surface du béton vers l'intérieur. Lorsque le front de carbonatation atteint les armatures, la couche d'oxydes qui les protégeait de la corrosion en milieu à pH élevé disparaît : elles sont dépassivées et risquent dès lors de se corroder (de rouiller) en présence d'oxygène et d'eau.

**Ciment** :
Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire un matériau inorganique finement moulu qui, gâché avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit à la suite de réactions d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau.[2]

**Cintre** :
Ouvrage provisoire qui épouse la forme de l'intrados d'un arc ou d'une voûte pour les soutenir pendant leur construction ou leur réparation. [1] Par extension, ce terme est également utilisé pour les supports de coffrage notamment dans le cas des tabliers des ponts.

**Clavette d'ancrage** :
Voir Chapitre 3 : Le béton précontraint. Principes et évolutions technologiques

**Coffrage** :
Ensemble du moule provisoire préparé pour couler le béton d'un élément, puis retiré après sa prise et son durcissement. Son maintien en place pendant plusieurs jours contribue à la cure du béton. Il est généralement en bois ou en métal et doit être maintenu, pour reprendre les poussées exercées par le béton, par des contreforts, des étais ou des raidisseurs.[1]

**Coffrage perdu** :
Élément coffrant destiné à rester en place après le coulage du béton. Il fait partie intégrante de l'ouvrage et constitue, dans certains cas, son parement.[1]

**Coffrage glissant** :
Coffrage de voile en béton armé prenant appui sur la partie de voile déjà réalisée qui se déplace verticalement de manière autonome. ([1] p. 121)

**Coffrage grimpant** :
Coffrage de voile en béton armé prenant appui sur la partie de voile déjà réalisée et déplacé verticalement pour la levée suivante à l'aide de vérins ou d'une grue.

**Corrosion des armatures** :
Phénomène chimique altérant la surface des armatures incluses dans le béton armé en présence d'eau et d'oxygène. Elle apparaît lorsque la couche de passivation des armatures est attaquée par des chlorures ou a subi une diminution du pH. Ainsi si l'enrobage (voir : Enrobage) de béton est insuffisant, si le béton est trop poreux ou carbonaté (voir : Carbonatation), le risque de corrosion est élevé.

**Coulis de ciment** :
Mélange de ciment d'eau et d'adjuvants utilisé pour injecter des fissures, remplir des gaines de câbles ou de barres de précontrainte...

**Cure du béton** :
On entend principalement par cure du béton sa protection contre une dessiccation prématurée. [3]

**Décoffrage** :
Le décoffrage correspond à l'enlèvement des parois du coffrage ; il peut se faire quelques heures après la prise moyennant une cure du béton. L'élément en béton décoffré devra être soutenu jusqu'à ce que le béton ait acquis une résistance suffisante.[3]

**Décintrement** :
Le décintrement correspond au retrait des éléments provisoires de soutien de l'élément en béton pendant la période de durcissement du béton. Le décintrement ne peut avoir que lorsque le béton a une résistance suffisante. [3]

**Élément préfabriqué** :
Élément en béton armé ou précontraint, réalisé en usine ou sur chantier, destiné à être intégré ultérieurement à la construction.

**Enrobage** :
Distance entre le nu de l'armature et la paroi du béton la plus proche. L'enrobage nominal (= enrobage minimum + tolérance) doit être suffisant (de 25 à 65 mm en général selon la destination de l'ouvrage) pour que les armatures soient protégées contre la corrosion.

**Entretoise** :
Élément rigide reliant deux ou plusieurs éléments qui lui sont perpendiculaires tout en maintenant un écart fixe entre ces éléments, l'emploi d'entretoises permet d'obtenir un fonctionnement structural plus homogène.[1]

**Étrier** :
Voir Armature

**Ferraillage** :
Ensemble des armatures d'acier d'un élément ou d'une structure en béton armé. [1]

**Fils** :
Voir Chapitre 3 : Le béton précontraint. Principes et évolutions technologiques

**Fils toronnés / torons** :
Voir Chapitre 3 : Le béton précontraint. Principes et évolutions technologiques

**Fissure** :
Ouverture dans un élément induite par son chargement. **Fissuration** : Ensemble des fissures présentes dans un élément structural. [1] Les origines de la fissuration sont diverses, et la fissuration peut survenir au jeune âge ou à long terme. Le béton armé est presque inévitablement **microfissuré**, à tout le moins en surface ou à son interface avec les armatures mais cette fissuration, diffuse, n'est pas visible à l'œil nu. Elle n'affecte normalement ni la durabilité ni l'étanchéité. La **macrofissuration** correspond à l'apparition de fissures discrètes, parfois traversantes, qui deviennent visibles au-delà de 0,2mm d'ouverture. À partir de cette ouverture, elles peuvent compromettre l'aptitude au service des constructions en béton armé et leur durabilité en fonction de la destination de l'ouvrage.

**Flèche** :
Déplacement vertical maximal d'une poutre soumise à de la flexion, souvent en centre de travée. [1]

**Fluage (du béton) :**
Augmentation, avec le temps, de la déformation d'un matériau sous une sollicitation appliquée constante.[1]

**Gaine** :
Voir Chapitre 3 : Le béton précontraint. Principes et évolutions technologiques

**Granulat** :
Ensemble des matériaux inertes, naturels et artificiels, qui constituent le squelette du béton et qui sont solidarisés par le ciment.[2]

**Gunitage** :
Bétonnage par projection par un système à air comprimé.

**Hauban (d'un pont)** :
Câble ou barre servant à soutenir le tablier d'un pont.

**Hourdis** :
Pièce allongée préfabriquée en béton armé ou précontraint servant d'élément de plancher ou de couverture. La portée d'un hourdis peut dépasser 15 m. [1]

**Injection** :
Mise en œuvre sous pression de coulis de ciment ou autre. Injection de fissures.

**Mortier / mortier de ciment** :
Un mortier est un mélange de liant (ciment), de granulat fin (sable) et d'eau.

**Noyau (de contreventement)** :
Élément vertical composé de voiles en béton armé destiné à assurer le contreventement (stabilité au vent) des bâtiments élevés. Ce noyau est généralement placé au centre du bâtiment et il contient les circulations verticales de personnes (ascenseurs, escaliers...) et de fluide (eau, air, ..).

**Panneau sandwich** :
Élément préfabriqué non-porteur de paroi extérieure constitué d'une partie centrale isolante prise entre deux parements.[1]

**Passivation (des armatures)** :
Protection vis-à-vis de la corrosion des armatures incluses dans le béton armé par l'alcalinité du béton, par des produits destinés à leur protection en cas de réparation...

**Pertes (différées) de précontrainte** :
Pertes d'effort dans les barres ou câbles de précontrainte suite au raccourcissement du béton par retrait et fluage et à la relaxation de l'acier. Voir Chapitre 3 : Le béton précontraint. Principes et évolutions technologiques.

**Plancher-dalle** :
Dalle qui s'appuie directement sur les colonnes sans l'intermédiaire de poutres. Dans certains cas, des chapiteaux sont placés en tête de colonnes : on parle alors de **planchers ou de dalles-champignons.**

**Porte-à-faux** :
Partie d'un élément ou d'un ouvrage qui est prolongée en surplomb au-delà de ses appuis.

**Pont cantilever** :
Pont dont la partie centrale s'appuie sur les « porte-à-faux » des travées adjacentes.

**Pont construit en encorbellement** :
Pont dont le tablier est construit par encorbellements (porte-à-faux) successifs. Les « tranches » préfabriquées du tablier, appelés voussoirs, sont progressivement assemblées les unes aux autres. Cette technique permet d'éviter le recours à des supports provisoires.

**Porosité** :
Le béton est un matériau poreux. Les pores, qui peuvent être interconnectés ou non suivant leur taille, contiennent de l'air et éventuellement de l'eau si celle-ci n'est pas entièrement consommée par les réactions d'hydratation. Pour augmenter la résistance des bétons, il faut réduire la porosité. Mais dans certains cas (incendie, gel...) un certain degré de porosité a un effet bénéfique.

**Poutre en caisson** :
Poutre creuse en béton armé ou précontraint utilisée principalement dans le domaine des ponts.

**Précontrainte par post-tension** :
Voir Chapitre 3 : Le béton précontraint. Principes et évolutions technologiques

**Précontrainte par pré-tension** :
Voir Chapitre 3 : Le béton précontraint. Principes et évolutions technologiques

**Préfabrication** :
Voir Éléments préfabriqués

**Progressive collapse**
**(Effondrement en cascade)** :
Un bâtiment subit un effondrement en cascade lorsque l'effondrement d'un seul élément structural primaire entraîne l'effondrement d'un élément structural voisin, puis de toute la structure ou d'une partie significative (comme un château de cartes). La conception structurale doit viser à prévenir ce genre de défaillance, notamment par le chaînage des éléments préfabriqués.

**Radier** :
Plate-forme en béton, en maçonnerie, en gravier ou en bois posée à même le sol et qui sert de fondation superficielle et d'assise à une construction.[1]

**Ragréage** :
Correction des défauts de surface d'un voile, d'une dalle en béton. Le ragréage peut se faire à l'aide d'un mortier fin.

**Relaxation (de l'acier de précontrainte)** :
Diminution dans le temps de la contrainte au sein du matériau sous déformation imposée constante

**Retrait (du béton)** :
Réduction avec le temps du volume de béton. À titre d'exemple, une poutre en béton d'une dizaine de mètres de long se raccourcira de quelques mm. Les efforts induits par le retrait peuvent conduire à la fissuration d'éléments en béton armé lorsque celui-ci ne peut se faire sans entrave.

**Serrage (du béton)** :
Le béton fraichement coulé contient une quantité importante d'air occlus, celle-ci doit être réduite pour que le béton ait une résistance à la compression suffisante. Le serrage est l'opération destinée à désaérer le béton frais. Il peut se faire par vibrations, par chocs...[2]

**Structure hypostatique, isostatique, hyperstatique** :
Le nombre d'appuis d'une structure isostatique est « juste » suffisant à sa stabilité. Un tabouret à 3 pieds est isostatique. Si le nombre d'appuis est surabondant la structure est hyperstatique (tabouret à 4 pieds). Si le nombre d'appuis est insuffisant, la structure est hypostatique.

**Treillis (d'armatures)** :
Réseau plan ou (par la suite) plié à mailles rectangulaires ou carrées, constitué dans chaque direction d'armatures d'un même diamètre soudées entre elles.

**Vibration du béton** :
Voir Serrage

**Voile en béton** :
Mur en béton généralement vertical.

**Voiles minces en béton armé** :
Structures en voile de béton armé (plan ou courbe) de faible épaisseur (6 à 12 cm) dont la résistance et la raideur sont données par la forme globale du voile. Voir Chapitre 6.

**Voile plissé** :
Structure en voiles minces plans de béton armé dont la résistance et la raideur sont données par le plissé global. Voir Chapitre 6.

**Voussoirs** :
Élément en pierre de taille ou autre, en forme de coin, formant l'appareillage d'un arc.
Élément préfabriqué en béton armé constituant un segment d'arc ou d'anneau dans le cas de tunnel construit au tunnelier ou au bouclier.[1]
Voir Pont construit en encorbellement.

## RÉFÉRENCES

[1] Attas, D. et Provost, M. et al. (2011). Bruxelles, Sur les traces des ingénieurs bâtisseurs, 294 à 309. CIVA-ULB-VUB
[2] Technologie du béton. Groupement belge du béton. Bruxelles. 4ème édition, (2006).
[3] Provost M. (2007). Conception des ouvrages en béton. PUB. ULB

# AUTEURS


- Bruno Albert - Bruno Albert Architecte & Associés (Liège) - atelier@brunoalbert.be
- Raymond Balau - Professeur - ENSAV La Cambre (Bruxelles) - raymond.balau@skynet.be
- Jacques Barlet - Expert - Institut du Patrimoine wallon - ndeharlez@digiline.be
- Hugo Claes - Régie des Bâtiments - hugo.claes@buildingsagency.be
- Jean-Marie Crémer - Bureau Greisch (Liège-Bruxelles) - jmcremer@greisch.com
- Jan de Moffarts - ORIGIN Architecture & Engineering (Bruxelles) - jan.demoffarts@origin.eu
- Jean-Yves Del Forno - Bureau Greisch (Liège-Bruxelles) - jydelforno@greisch.com
- Philippe Demars - Directeur honoraire - Service Public de Wallonie - demarsp@skynet.be
- Jean-François Denoël - FEBELCEM - jf.denoel@febelcem.be
- David Dewolf - Bureau Greisch (Liège-Bruxelles) - ddewolf@greisch.com
- Pierre-Marie Dubois - Bureau d'études P.M.D. (Ophain-Bois-Seigneur-Isaac) pmd@skynet.be
- Bernard Espion - Professeur - Université Libre de Bruxelles - Bernard.Espion@ulb.ac.be
- Klaas Goris - Coussée & Goris architecten (Gent) - klaas@coussee-goris.com
- Armande Hellebois - Aspirante F.R.S.-FNRS - Université Libre de Bruxelles Armande.Hellebois@ulb.ac.be
- Eric Hennaut - Université Libre de Bruxelles - eric.hennaut@hotmail.com
- Pablo Lhoas - Lhoas & Lhoas Architectes (Bruxelles) - Université Libre de Bruxelles pablo@lhoas-lhoas.com
- Sébastien Mainil - Institut du Patrimoine wallon - s.mainil@idpw.be
- Guy Mouton - Studieburo Mouton (Gent) - Hogeschool Sint-Lucas Gent/Brussel - guy@studieburomouton.be
- Charlotte Nys - ORIGIN Architecture & Engineering (Bruxelles) - Universiteit Gent - Vrije Universiteit Brussel - chn@origin.eu
- Jean-Sébastien Pirnay - PIRNAY ingénieurs (Charleroi) - js.pirnay@bepirnay.be
- Michel Provost - Professeur - Université Libre de Bruxelles - ORIGIN Architecture & Engineering (Bruxelles) - mprovost@ulb.ac.be
- Yves Rammer - Professeur - Université Libre de Bruxelles - yrammer@ulb.ac.be
- Jacques I. Schiffmann - Chargé de cours honoraire - Université Libre de Bruxelles - Bureau d'études SETESCO (Bruxelles) - j.i.schiffmann@skynet.be
- Vincent Servais - Bureau Greisch (Liège-Bruxelles) - vservais@greisch.com
- Pascal Simoens - SKOPE (Bruxelles) - ps@skope.be
- Luc Taerwe - Professeur - Universiteit Gent - luc.taerwe@ugent.be
- Simon Vaillant - Archiviste-documentaliste - Centre d'archives d'architecture du XX<sup>e</sup> siècle, Paris - svaillant@citechaillot.fr
- Stephanie Van de Voorde - Docteur ir-arch. - Vrije Universiteit Brussel - Universiteit Gent - stephanie.van.de.voorde@vub.ac.be
- Anne Van Loo - Secrétaire permanente - Commission royale des Monuments et des Sites de la Région de Bruxelles-Capitale - avanloo@mrbc.irisnet.be
- Denis Zastavni - Professeur - Université catholique de Louvain - denis.zastavni@uclouvain.be

## INTERVENANTS ET REMERCIEMENTS



### COMITÉ DE RÉDACTION
Jean-François Denoël, Bernard Espion, Armande Hellebois, Michel Provost

### GRAPHISME

Marc Laurent - Images de Marc sprl
www.imagesdemarc.be

### IMPRESSION

Paperland - Bruxelles

### CRÉDITS PHOTOGRAPHIQUES

Les crédits des illustrations utilisées dans les articles sont repris
dans les références correspondantes.

Nous nous sommes efforcés de régler les droits relatifs aux illustrations conformément aux prescriptions légales. Les détenteurs de droits, que, malgré nos recherches, nous n'aurions pas pu trouver, sont priés de se faire connaître.

ISBN : 978-2-9600430-9-9
Dépôt légal : D/2013/0280/03

## LES ÉDITEURS REMERCIENT

Les auteurs pour leur contribution à cet ouvrage sans quoi ce projet n'aurait pu voir le jour.

Les sponsors pour leur confiance et leur générosité :

La Wallonie www.wallonie.be
L'Institut du Patrimoine wallon www.institutdupatrimoine.be
AR-CO Assureur des ingénieurs et architectes www.ar-co.be
BATir - École polytechnique de l'Université Libre de Bruxelles batir.ulb.ac.be
Bruno Albert Architecte & Associés S.C www.brunoalbert.be
Bureau d'études Matriche www.matriche.net
Bureau d'études SETESCO www.setesco.be
Bureau Greisch www.greisch.com
CFE www.cfe.be
Freyssinet Belgium SA www.freyssinet.be
SKOPE architecture – City Planning – Landscape Design www.skope.be
ORIGIN Architecture & Engineering www.origin.eu
PMD-ATEAV Systems sprl www.pmd-ateav.com
Studieburo Mouton www.studieburomouton.be
SECO www.seco.be
UCL- Faculté d'architecture, d'ingénierie architecturale, d'urbanisme [LOCI] www.uclouvain.be/loci

Ainsi que :

Dominique Pierson et Isabelle Toussaint du service BATir de l'Université Libre de Bruxelles pour leur assistance attentive à la rédaction de cet ouvrage.

Jean-Claude Mongay pour son aide précieuse dans l'inventaire des brevets belges déposés sur le béton armé de 1855 à 1913, aujourd'hui accessibles aux Archives Générales du Royaume.

Pieterjan Franck et Laurien Gemmeke de ORIGIN Architecture & Engineering pour la réalisation de figures.

David Attas pour son aide à la réalisation du glossaire.



**Passerelle Mativa à Liège** © Jean-Luc Deru
1905
Ingénieur : F. Hennebique



**Maison Delsemme à Tilff** © Serge Brison
2002
Architectes : Bruno Albert Architecte et Associés
Ingénieurs : Bureau Greisch







Une publication FEBELCEM en collaboration avec FABI Comité Patrimoine et Histoire

FEBELCEM
Fédération de l'Industrie Cimentière Belge
Boulevard du Souverain 68 - 1170 Bruxelles
tél. 02 645 52 11 - fax 02 640 06 70
www.febelcem.be - info@febelcem.be

FABI
Fédération Royale d'Associations Belges d'Ingénieurs Civils, d'Ingénieurs Agronomes et de Bioingénieurs
Rue Hobbema 2 - 1000 Bruxelles
tél. 02 734 75 10 - fax 02 734 53 15
www.fabi.be - fabi@fabi.be

Ed. resp. : A. Jasienski

infobeton.be

Dans cet ouvrage coédité par FEBELCEM et le Comité Patrimoine et Histoire de la FABI, une trentaine de spécialistes éminents, ingénieurs, architectes, historiens, professeurs, praticiens, nous font parcourir plus d'un siècle d'histoire du béton armé et précontraint.

Des articles généraux nous parlent des découvertes et de l'évolution des techniques, des articles d'applications nous présentent une trentaine d'exemples, principalement en Belgique, mais également dans le monde, du début du 20ème siècle à nos jours.

En introduction à cet ouvrage, une liste chronologique d'ouvrages marquants de l'histoire du béton armé et précontraint donne des repères au lecteur et chacun des sept chapitres qui le composent se termine par une liste de références.

Un glossaire reprenant les termes essentiels du béton armé et précontraint complète cet ouvrage destiné tant aux spécialistes qu'à tous ceux qui sont intéressés par ce matériau incontournable de la construction depuis le début du 20ème siècle.











































